TUGAS AKHIR – RF 184838

PENDUGAAN KEMENERUSAN ALIRAN SUNGAI BAWAH PERMUKAAN DESA SEKAR, PACITAN MENGGUNAKAN METODE VLF-EM DENGAN FILTER EEMD

SITI IMANIA LUHRI
NRP. 03411640000011

Dosen Pembimbing I :
Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si., M.T.
NIP. 19690906 199702 1 001

Dosen Pembimbing II :
Anik Hilyah, S.Si., M.T.
NIP. 19790813 200812 2 002

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL PERENCANAAN DAN KEBUMIAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

TUGAS AKHIR – RF 184838

PENDUGAAN KEMENERUSAN ALIRAN SUNGAI BAWAH PERMUKAAN DESA SEKAR, PACITAN MENGGUNAKAN METODE VLF-EM DENGAN FILTER EEMD

SITI IMANIA LUHRI
NRP. 03411640000011

DOSEN PEMBIMBING I :
Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, M.T
NIP. 19690906 199702 1 001

DOSEN PEMBIMBING II :
Anik Hilyah, S.Si., M.T.
NIP. 19790813 200812 2 002

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL PERENCANAAN DAN KEBUMIAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

UNDERGRADUATE THESIS – **RF184838**

ESTIMATION OF UNDERGROUND RIVER FLOW IN SEKAR VILLAGE, PACITAN USING VLF-EM METHOD WITH EEMD FILTER

SITI IMANIA LUHRI
NRP. 03411640000011

SUPERVISOR I :
Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, M.T
NIP. 19690906 199702 1 001

SUPERVISOR II :
Anik Hilyah, S.Si., M.T.
NIP. 19790813 200812 2 002

GEOPHYSICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FAKULTY OF CIVIL, PLANNING AND GEO ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2020

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

PERNYATAAN KEASLIAN
TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "Pendugaan Kemenerusan Aliran Sungai Bawah Permukaan Desa Sekar, Pacitan Menggunakan Metode VLF-EM dengan Filter EEMD" adalah benar-benar 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 maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

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

Surabaya, 27 Juli 2020

Siti Imania Luhri
NRP. 03411640000011

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh

Nama	:	Siti Imania Luhri
NRP	:	0341 16 40000 011
Departemen	:	Teknik Geofisika
Judul Tugas Akhir	:	Pendugaan Kemenerusan Aliran Sungai Bawah Permukaan Desa Sekar, Pacitan Menggunakan Metode VLF-EM dengan Filter EEMD

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 Kebumian, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 30 Juli 2020

1. .....
   Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si., M.T (Pembimbing 1)
   NIP. 19690906 199702 1 001
2. .....
   Anik Hilyah, S.Si., M.T. (Pembimbing 2)
   NIP. 19790813 200812 2 002
3. .....
   Wien Lestari, S.T., M.T (Penguji 1)
   NIP. 19811002 201212 2 003
4. .....
   Nita Ariyanti, S.T., M. Eng (Penguji 2)
   NIP. 370181001

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

Dr. DwaDesaWarnana
NIP. 19760123 200003 1 001

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

Pendugaan Kemenerusan Aliran Sungai Bawah Permukaan Desa Sekar, Pacitan Menggunakan Metode VLF-EM dengan Filter EEMD

Nama Mahasiswa	: Siti Imania Luhri
NRP	: 03411640000011
Departemen	: Teknik Geofisika ITS
Dosen Pembimbing I	: Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si., M.T.
Dosen Pembimbing II	: Anik Hilyah, S.Si., M.T.

ABSTRAK

Sungai bawah permukaan yang berada di karst memiliki karateristik yang kompleks. Daerah karst didominasi oleh batuan mudah larut sehingga menyebabkan sistem aliran airnya memiliki kecepatan aliran dan pelarutan yang tinggi. Hal tersebut menyebabkan heterogenitas yang tinggi akibat dari terbentuknya sistem aliran air tanah sehingga cukup sulit untuk dideteksi keberadaannya. Selain itu, banyak gua vertikal (luweng) yang terbentuk akibat pelarutan batuan yang kemudian menjadi penanda adanya aliran sungai bawah tanah. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kemenerusan aliran sungai bawah permukaan pada Luweng Tanjung dan Luweng Koboran di Desa Sekar, Pacitan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah VLF-EM. Akuisisi dilakukan dengan 3 lintasan yang masing-masing panjangnya 350 m, 425 m dan 550 m. Pengolahan data dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Kualitatif dengan menggunakan beberapa *filter* yaitu *filter* EEMD, fraser dan karous-hjelt sedangkan kuantitatif dengan inversi. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa terdapat kemenerusan aliran dari Luweng Tanjung ke Luweng Koboran yang berarah timur laut-barat daya azimuth 15^{o} SW. Interpretasi menunjukkan sungai bawah tanah yang berisi air diduga terdapat pada kedalaman 20-40 m dengan nilai resistivitas 20-250 Ohm.m.

Kata kunci : *filter* EEMD, karst, luweng, VLF-EM

Estimation Of Underground River Flow In Sekar Village, Pacitan Using VLF-EM Method With EEMD Filter

Name	: Siti Imania Luhri
Student ID	: 03411640000011
Departement	: Geophysic Engineering ITS
Advisor I	: Dr. Ayi Syaeful Bahri, S.Si, M.T.
Advisor II	: Anik Hilyah, S.Si., M.T.

ABSTRACT

Underground rivers in karst have complex characteristics. Karst areas generally have high water velocity and flow rates caused by domination of soluble rocks. This condition causes high heterogenity due to the formation of a groundwater system, resulting to its presence that is quite difficult to be detect. In addition, many vertical caves (luweng) formed by dissolving rocks which later became a marker of underground river flow. The purpose of this study was to determine the continuity of subsurface river flows in Luweng Tanjung and Luweng Koboran in Sekar Village, Pacitan. The method used in this study is VLF-EM. The acquisition was carried out with 3 lines each of 350 m, 425 m and 550 m in length. Data processing is done qualitatively and quantitatively. Qualitative by using several filters namely EEMD, fraser and karous-hjelt while quantitative with inversion. The results obtained indicate that there is a continuity from Luweng Tanjung to Luweng Koboran with trend NW-SE azimuth 15^{o} SW. Interpretation shows that underground rivers contain with water are suspected to be at a depth of 20-40 m with resistivity values of 20-250 Ohm.m.

Key words: *filter* EEMD, karst, luweng, VLF-EM

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadirat Allah SWT karna telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga Laporan Tugas Akhir yang berjudul "Pendugaan Kemenerusan Aliran Sungai Bawah Permukaan Desa Sekar, Pacitan Menggunakan Metode VLF-EM dengan Filter EEMD" dapat terselesaikan.

Dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini tentunya tidak lepas dari peran dan dukungan banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua, Bapak Ismaun Marzuki, SE dan Ibu Baiq Laili Susianti, serta adik-adik Siti Hamida Zahri dan Siti Meisari Mauli yang senantiasa menjadi pendukung moril dan menemani saat pembuatan laporan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si., M.Si selaku Kepala Departemen Teknik Geofisika ITS
3. Bapak Ayi Syaeful Bahri, S.Si., M.T. selaku dosen pembimbing pertama dan Ibu Anik Hilyah, S.Si., M.T. selaku dosen pembimbing kedua yang selalu menguatkan dan menghibur dengan memberikan komentar positif saat bimbingan.
4. Ibu Wien Lestari, S.T., M.T. dan Ibu Nita Ariyanti, S.T., M.Eng. selaku dosen penguji I dan II dalam sidang tugas akhir ini.
5. Para dosen dan Staf tata usaha Departemen Teknik Geofisika ITS yang telah memberikan ilmu dan membantu secara administrasi selama kuliah.
6. Tim Pacitan dan Pak Nardi yang membantu serta menunjang penulis saat akuisisi data dan diskusi untuk tugas akhir.
7. Teman angkatan TG 05 yang telah menemani selama 4 tahun masa kuliah dan selalu membantu dan menyemangati.
8. Teman-teman GP dari SMP hingga sekarang yang telah menjadi pengingat dan pendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Semua pihak yang tidak dapat dituliskan satu per satu oleh penulis.

Semoga Allah senantiasa membalas semua kebaikan yang diberikan oleh semua pihak. Penulis sangat menyadari dalam tugas akhir ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan orang banyak.

Surabaya, 27 Juli 2020

Siti Imania Luhri

DAFTAR ISI

HALAMAN COVER i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR iv
LEMBAR PENGESAHAN ..... **Error! Bookmark not defined.**
ABSTRAK vii
ABSTRACT viii
KATA PENGANTAR x
DAFTAR ISI xi
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR TABEL xv
DAFTAR LAMPIRAN xvi
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 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 4
2.1 Dasar Teori 4
2.1.1 Geologi Regional 4
2.1.2 Metode Very Low Frequency (VLF) 13
2.2 Penelitian Terdahulu 25
BAB III METODOLOGI 28
3.1 Waktu dan Tempat 28
3.2 Lokasi Penelitian 28
3.3 Desain Akuisisi 28
3.4 Peralatan Penelitian 29
3.5 Diagram Alir Penelitian 29
3.6 Tahapan Penelitian 30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 32
4.1 Analisis Hasil Pengolahan Data 32
4.1.1 Analisis Hasil Pengolahan Filter EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) 32
4.1.2 Analisis Hasil Pengolahan Filter Fraser 34
4.1.3 Analisis Hasil Pengolahan Filter Karous-Hjelt (KHjelt) 36
4.1.4 Analisis Hasil Pengolahan Inversi 37
4.2 Analisis Pembahasan 39
4.2.1 Analisis Kemenerusan Sungai Bawah Permukaan 39
4.2.2 Integrasi dengan Metode Resistivitas 43

BAB V SIMPULAN DAN SARAN 45
5.1 Kesimpulan 45
5.2 Saran 45
DAFTAR PUSTAKA 46
LAMPIRAN 50
BIOGRAFI PENULIS 54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Pembagian Fisiografi Regional Jawa Bagian Tengah dan Timur (Van Bemmelen, 1949)..... 4
Gambar 2. 2 Peta Geologi Daerah Penelitian (Samodra dan Gafoer, 1990 yang telah dimodifikasi). Kotak kuning menunjukkan daerah penelitian. 5
Gambar 2. 3 Stratigrafi barat Pegunungan Selatan dari beberapa peneliti (Surono, 1992). 6
Gambar 2. 4 Skema proses pelarutan batu gamping (Haryono dan Adji, 2017)8
Gambar 2. 5 Drainase bawah permukaan di daerah karst (Sumber: http://www.eccentrix.com/members/hydrogeologie/hidrogeol/karst.gif) 10
Gambar 2. 6 Diffuse, campuran dan conduit airtanah karst (Domenico dan Schwartz 1990) dalam (Haryono dan Adji, 2017b) 11
Gambar 2. 7 Sistem aliran internal pada akuifer karst (White, 1988) dalam (Haryono dan Adji, 2017)..... 12
Gambar 2. 8 Sistem aliran conduit vs sistem aliran diffuse (White, 1988) dalam (Haryono dan Adji, 2017) 12
Gambar 2. 9 Gelombang Elektromagnetik untuk metode VLF (Reynolds, 2011)..... 14
Gambar 2. 10 Hubungan amplitudo dan fase gelombang sekunder (S) dan primer (P) (Kaikkonen, 1979)..... 15
Gambar 2. 11 Parameter polarisasi elips akibat benda konduktif pada bidang medan elektromagnetik (Saydam, 1981) 16
Gambar 2. 12 Desain Survey Mode Sudut Tilt 16
Gambar 2. 13 Grafik Tilt dan Ellips vs Jarak Sebelum (atas) dan Setelah (bawah) Moving Average Pada Lintasan Ketiga (Indriyani dkk, 2014) 18
Gambar 2. 14 Filter Moving average dalam inphase-down data lintasan 1 .. 19
Gambar 2. 15 Hubungan Grafik Smoothing Tilt dan Ellips vs Jarak dengan Grafik Fraser Derivatif Pada Lintasan Ketiga (Indriyani dan others, 2014) 20
Gambar 2. 16 Filter Fraser diaplikasikan dalam data real (inphase) dan imaginer (quadrature) lintasan 1 down (Bahri dkk, 2010)..... 20
Gambar 2. 17 Hasil Filter Karous-HJelt (atas) dan penampang RAE surfer (bawah) lintasan VLF 10 (Wardhana, 2018) 21
Gambar 2. 18 Contoh Penerapan Filter EEMD..... 23
Gambar 2. 19 Hasil pengolahan Karous-Hjelt lintasan 1-5..... 26
Gambar 2. 20 Penampang Hasil Pengolahan Software RockWorks 26
Gambar 2. 21 Salah satu data lintasan VLF sebelum dan sesudah dilakukan filter EEMD 27

Gambar 3. 1 Desain Akuisisi Penelitian 29
Gambar 3. 2 Diagram alir penelitian..... 30

Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Ketiga Lintasan Data Akuisisi dengan Data yang sudah di-filter EEMD. Grafik Lintasan 1 (kiri atas), Grafik Lintasan 2 (kanan atas) dan Grafik Lintasan 3 (bawah tengah). 32
Gambar 4. 2 Perbandingan penampang RAE lintasan 1 tanpa filter EEMD (atas) dengan menggunakan filter EEMD (bawah) 33
Gambar 4. 3 Perbandingan penampang RAE lintasan 2 tanpa filter EEMD (atas) dengan menggunakan filter EEMD (bawah) 33
Gambar 4. 4 Perbandingan penampang RAE lintasan 3 tanpa filter EEMD (atas) dengan menggunakan filter EEMD (bawah) 34
Gambar 4. 5 Grafik Fraser lintasan 1 (anomali konduktif ditandai oleh lingkaran hitam) 35
Gambar 4. 6 Grafik Fraser lintasan 2 (anomali konduktif ditandai oleh lingkaran hitam) 35
Gambar 4. 7 Grafik Fraser lintasan 3 (anomali konduktif ditandai oleh lingkaran hitam) 36
Gambar 4. 8 Penampang RAE lintasan 1..... 37
Gambar 4. 9 Penampang RAE lintasan 2..... 37
Gambar 4. 10 Penampang RAE lintasan 3..... 37
Gambar 4. 11 Penampang resistivitas lintasan 1..... 38
Gambar 4. 12 Penampang resistivitas lintasan 2..... 38
Gambar 4. 13 Penampang resistivitas lintasan 3..... 38
Gambar 4. 14. Rentang Nilai Resisitivitas Batuan (Loke, 2015)..... 40
Gambar 4. 15 Kemenerusan Anomali yang terlihat di Ketiga Lintasan 42
Gambar 4. 16 Hasil Pengolahan Lintasan 2 Metode Resistivitas. Anomali ditandai dengan garis-garis berwarna hitam (Tobing, 2020)..... 43
Gambar 4. 17 Dugaan Kemenerusan Aliran Sungai Bawah Tanah Metode VLF dan Resistivitas 44

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Koordinat lintasan pengukuran 28

DAFTAR LAMPIRAN

Gambar 1. Luweng Koboran 1..... 50
Gambar 2. Luweng Koboran 2..... 50
Gambar 3. Pengukuran Titik Pertama Lintasan 1 51
Gambar 4. Pengukuran Titik Terakhir Lintasan 1 51
Gambar 5. Pengukuran Titik Pertama Lintasan 2 52
Gambar 6. Pengukuran Titik Terakhir Lintasan 2 52
Gambar 7. Pengukuran Titik Pertama Lintasan 3 53

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pacitan memiliki 3 (tiga) satuan wilayah morfologi yaitu, morfologi perbukitan, morfologi karst dan morfologi dataran. Desa Sekar merupakan daerah yang didominasi oleh morfologi karst. Ford dan Williams (1989) mendefinisikn karst sebagai medan dengan kondisi hidrologi yang khas sebagai akibat dari batuan yang mudah larut dan mempunyai porositas sekunder yang berkembang baik. Akibatnya, pada daerah karst berkembang pula sistem drainase bawah permukaan yang jauh lebih dominan dibandingkan dengan sistem aliran permukaannya (Haryono dan Adji, 2017). Daerah karst pada umumnya mengalami kekeringan di musim kemarau, hal tersebut berkaitan dengan sistem drainase bawah permukaan. Air hujan di permukaan tanah akan langsung masuk ke jaringan sungai bawah tanah melalui *ponor* (Karunia, 2012). Daerah penelitian didominasi batuan gamping yang erat kaitannya dengan retakan dan celah karena terkikis oleh air hujan. Batuan tersebut kemudian berubah menjadi gua-gua yang terisi air akibat terjadinya proses pelarutan. Untuk mengetahui jalur sungai bawah permukaan yang melewati lorong-lorong gua tersebut diperlukan suatu metode geofisika yang efektif dan efisien sesuai dengan keadaan topografi di daerah Gunung Sewu (Anita dan Sismanto, 2011). Metode yang cocok diterapkan untuk eksplorasi sungai bawah permukaan pada daerah karst adalah *Very Low Frequency* (VLF).

VLF-EM adalah suatu metode geofisika yang digunakan untuk memetakan zona konduktif. Gua-gua yang terisi oleh air tingkat konduktivitas listriknya cukup signifikan daripada lingkungan karst sendiri, sehingga memudahkan deteksi dengan metode VLF (Coppo dkk., 2006). VLF-EM menghasilkan respon yang jelas dan akusisi data yang relatif mudah walaupun medan yang memiliki morfologi dan topografi yang lumayan berat sehingga metode elektromagnetik ini cukup menjanjikan untuk digunakan dalam pemetaan sungai bawah tanah (Sismanto, 2002). Metode VLF-EM menggunakan pemancar atau transmitter radio militer maupun kapal selam dengan frekuensi 15-30 kHz yang menjalar sebagai gelombang tanah sekaligus gelombang pantul di antara permukaan bumi dan lapisan ionosfer. Sinyal ini berupa medan magnetik yang didefinisikan sebagai medan magnetik utama yang dapat menginduksi material konduktor bawah permukaan dan menimbulkan arus sekunder (arus Eddy) yang menghasilkan medan magnet, disebut medan magnet sekunder (Widyaningrum dkk., 2018). Kedua medan magnet (primer dan sekunder) inilah yang akhirnya akan diterima oleh receiver atau alat VLF. Menurut hasil penelitian Amrin dkk., n.d. dan Wardhana, 2018 untuk identifikasi kemenerusan sistem sungai bawah permukaan pada karst Pacitan dengan metode VLF didapatkan hasil yaitu pola aliran sungai dari arah timur ke barat dan kedalamannya berkisar antar 10-50 meter.

Selain pengolahan dengan filter pada umumnya di data VLF, penelitian ini juga menggunakan *filter* EEMD *(Ensemble Empirical Mode Decomposition)*. Filter ini memungkinkan data VLF dipecah menjadi beberapa bentuk IMF *(Intrinsic Mode Function)* yang kemudian akan dipilih IMF yang bebas *noise* lalu direkonstruksi sehingga didapatkan sinyal yang kualitasnya lebih bagus dan dapat memberikan informasi yang lebih akurat. Hasil penelitian menggunakan metode VLF dengan *filter* EEMD untuk memetakan struktur bawah permukaan Studi Kasus LUSI Sidoarjo (Rochman, dkk., 2014) dan untuk memetakan fosfat di daerah Sukolilo (Rochman, dkk., 2012) menyatakan bahwa proses filter EEMD mampu meningkatkan kualitas data dan menghilangkan *noise*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah

1. Bagaimana kemenerusan arah aliran sungai bawah permukaan pada Luweng Tanjung dan Luweng Koboran di Desa Sekar Kecamatan Donorejo menggunakan metode VLF dengan filter EEMD.
2. Berapa kedalaman sungai bawah permukaan yang ada pada kemenerusan aliran Luweng Tanjung dan Luweng Koboran.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Lokasi penelitian yaitu pada Luweng Tanjung dan Luweng Koboran di Desa Sekar Kecamatan Donorejo Kabupaten Pacitan.
2. Akuisisi data dilakukan pada bulan Agustus 2019
3. Metode yang digunakan adalah VLF-EM mode sudut tilt dengan filter EEMD.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah

1. Untuk menentukan kemenerusan arah aliran sungai bawah permukaan Luweng Tanjung dan Luweng Koboran di Desa Sekar Kecamatan Donorejo menggunakan metode VLF dengan filter EEMD.
2. Untuk menentukan kedalaman sungai bawah permukaan yang ada pada kemenerusan aliran Luweng Tanjung dan Luweng Koboran.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah untuk mengetahui keberadaan aliran sungai bawah permukaan di Desa Sekar Kecamatan Donorejo. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan informasi keberadaan sungai bawah permukaan dalam rangka pengembangan kawasan karst Pacitan dan dimanfaatkan untuk keperluan sehari-hari masyarakat sekitar.

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 Geologi Regional

2.1.1.1 Fisiografi Regional

Secara umum fisiografi Jawa Timur menurut Van Bemmelen (1949) dibagi menjadi 4 (empat) zona, yaitu Zona Rembang di bagian utara, kemudian ke bagian selatan Zona Rembang terdapat Zona Kendeng, lalu bagian selatan Zona Kendeng terdapat Zona Solo dan di bagian paling selatan adalah Zona Pegunungan Selatan (Gambar 2.1).

Gambar 2. 1 Pembagian Fisiografi Regional Jawa Bagian Tengah dan Timur (Van Bemmelen, 1949)

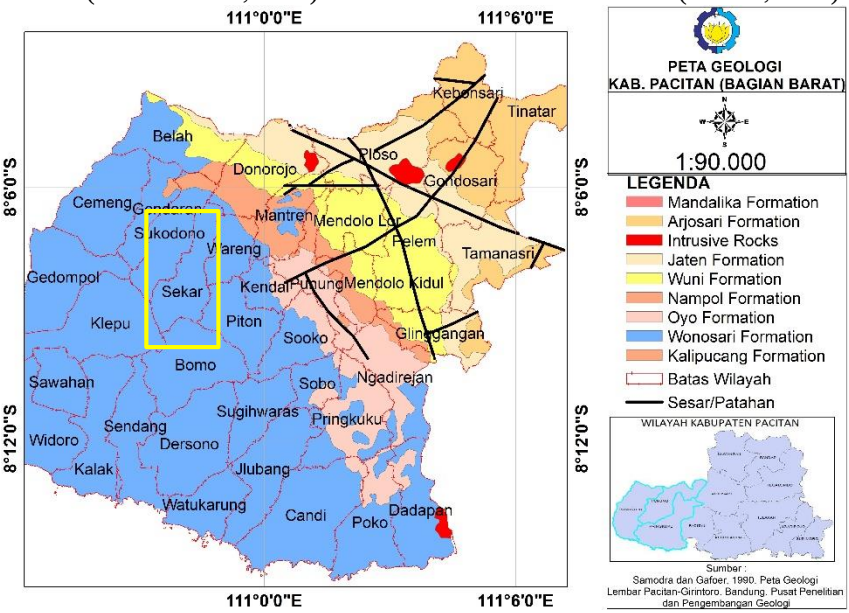
Lokasi penelitian yaitu Kabupaten Pacitan terdapat pada Zona Pegunungan Selatan di bagian Jawa Timur. Zona Pegunungan Selatan dapat dibagi menjadi tiga subzona, yaitu Subzona Baturagung, Subzona Wonosari dan Subzona Gunung Sewu (Harsolumekso dkk., 1997) dalam (Bronto dan Hartono, 2001). Subzona Baturagung ini membentuk relief paling kasar dengan sudut lereng antara 100 – 300 dan beda tinggi 200-700 meter serta hampir seluruhnya tersusun oleh batuan asal gunungapi. Subzona Wonosari merupakan dataran tinggi (± 190 m) yang terletak di bagian tengah Zona Pegunungan Selatan, yaitu di daerah Wonosari dan sekitarnya. Subzona Gunung Sewu merupakan perbukitan dengan bentang alam karst, yaitu bentang alam dengan bukit-bukit batugamping membentuk banyak kerucut dengan ketinggian beberapa puluh

meter. Bentang alam karst ini membentang dari pantai Parangtritis di bagian barat hingga Pacitan di sebelah timur.

Zona Pegunungan Selatan di Jawa Timur pada umumnya merupakan blok yang terangkat dan miring ke arah selatan. Di antara Parangtritis dan Pacitan merupakan tipe karst (kapur) yang disebut Pegunungan Seribu atau Gunung Sewu, dengan luas kurang lebih 1400 km^2 (Lehmann, 1939). Sedangkan antara Pacitan dan Popoh selain tersusun oleh batugamping (limestone) juga tersusun oleh batuan hasil aktivitas vulkanik berkomposisi asam-basa antara lain granit, andesit dan dasit (Van Bemmelen, 1949).

2.1.1.2 Stratigrafi Regional

Daerah penelitian yang berada di Desa Sekar, Kecamatan Donorejo Kabupaten Pacitan termasuk kedalam sebagian Peta Geologi Regional Lembar Pacitan (Samodra dkk., 1992) dan Lembar Surakarta-Girintoro (Surono, 1992)

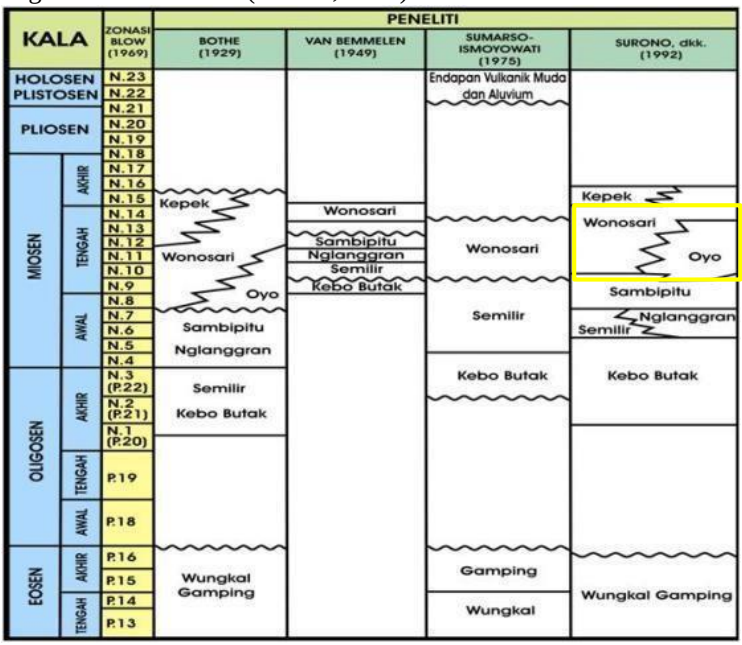


Gambar 2. 2 Peta Geologi Daerah Penelitian (Samodra dan Gafoer, 1990 yang telah dimodifikasi). Kotak kuning menunjukkan daerah penelitian.

Penamaan satuan litostratigrafi Pegunungan Selatan telah banyak dikemukakan oleh beberapa peneliti yang membedakan stratigrafi wilayah bagian barat (Parangtritis – Wonosari) dan wilayah bagian timur (Wonosari – Pacitan). Tetapi menurut peta geologi pada gambar di atas, daerah penelitian didominasi oleh formasi-formasi yang ada pada stratigrafi Zona Pegunungan Selatan bagian barat. Urutan stratigrafi Pegunungan Selatan bagian barat dari tua

ke muda adalah Formasi Wungkul Gamping, Kebo Butak, Semilir, Nglanggran, Sambipitu, Oyo, Wonosari dani Kepek (Surono, 1992.).

Berdasarkan peta geologi dan urutan stratigrafi (Gambar 2.3), daerah penelitian termasuk dalam Formasi Wonosari (Tmwl). Formasi ini oleh Surono dkk., (1992) dijadikan satu dengan Formasi Punung yang terletak di Pegunungan Selatan bagian timur karena di lapangan keduanya sulit untuk dipisahkan, sehingga namanya Formasi Wonosari-Punung. Formasi ini tersingkap baik di daerah Wonosari dan sekitarnya, membentuk bentang alam Subzona Wonosari dan topografi karst Subzona Gunung Sewu. Ketebalan formasi ini diduga lebih dari 800 meter. Kedudukan stratigrafinya di bagian bawah menjemari dengan Formasi Oyo, sedangkan di bagian atas menjemari dengan Formasi Kepek. Formasi ini didominasi oleh batuan karbonat yang terdiri dari batugamping berlapis dan batugamping terumbu. Sedangkan sebagai sisipan adalah napal. Sisipan tuf hanya terdapat di bagian timur. Berdasarkan kandungan fosil foraminifera besar dan kecil yang melimpah, diantaranya *Lepidocyclina sp.* dan *Miogypsina sp.*, ditentukan umur formasi ini adalah Miosen Tengah hingga Pliosen. Lingkungan pengendapannya adalah laut dangkal (zona neritik) yang mendangkal ke arah selatan (Surono, 1992)



Gambar 2. 3 Stratigrafi barat Pegunungan Selatan dari beberapa peneliti (Surono, 1992).

2.1.1.3 Sejarah Geologi

Sejarah geologi zona Pegunungan Selatan Jawa Timur dimulai pada kala Eosen Tengah sampai dengan Eosen Akhir. Formasi wonosari tebentuk berikutnya dengan umur Miosen Tengah hingga Pliosen. Lingkungan pengendapannya adalah laut dangkal (zona neritik) yang mendangkal ke arah selatan dengan litologi didominasi oleh batuan karbonat yang terdiri dari batugamping berlapis dan batugamping terumbu. Bagian bawah Formasi Wonosari adanya hubungan menjari dengan Formasi Oyo yang berarti pembentukannya seumur dengan Formasi Oyo bagian atas. Akhir pembentukan Formasi Wonosari bersamaan dengan terbentuknya Formasi Kepek, batuan penyusunnya adalah napal dan batugamping berlapis.

Cekungan pengendapan Pegunungan Selatan yang mengalami pengangkatan dan berubah menjadi dangkalan pada akhir Miosen Awal atau permulaan Miosen Tengah. Setelahnya terjadi perubahan muka laut, dimana hal itu menyebabkan terjadinya proses genang laut, yang diikuti dengan pengendapan batuan Formasi Oyo. Kegiatan tektonik gunung api di daratan mempengaruhi sedimentasi (karbonat) yang sedang terjadi di lingkungan laut dangkal. Beragam jenis klastika asal daratan dan tuf masuk ke dalam cekungan, menghasilkan Formasi Oyo yang bersifat klastik. Di dasar paparan yang berbatasan dengan daratan yang mulai stabil terbentuk terumbu-terumbu koral Formasi Wonosari (Samodra, 2003).

Permulaan Miosen Akhir keadaan tektonik yang stabil berhasil menciptakan kondisi yang sangat memungkinkan bagi pertumbuhan dan perkembangan batugamping terumbu paparan Formasi Wonosari. Kegiatan tektonik yang aktif pada Miosen Akhir menghasilkan sesar-sesar turun sehingga kawasan menciptakan bentukan sembulan (*horst*) dan amblesan (*graben*). Daerah tinggian kemudian mengalami pengikisan, dan batuan rombakan yang dihasilkan diendapkan pada cekungan yang semakin dangkal. Kemudian terbentuk Formasi Kepek berumur Miosen Akhir-Pliosen Awal. Masa Pliosen cekungan terangkat ke permukaan laut, dibuktikan dengan tidak ada endapan yang berlingkungan laut.

Saat seluruh kawasan Gunung Sewu terangkat di permukaan laut, gejala karstifikasi pun dimulai. Kekar dan sesar yang menyertai proses pengangkatan di Gunung Sewu merupakan bidang-bidang lemah yang mudah sekali mengalami pengikisan dan pelarutan. Air permukaan yang mengalir di sepanjang struktur geologi tersebut akan mengubah lembah sungai menjadi lebih dalam dan lebar. Beberapa mulut gua berukuran kecil yang tersingkap bersebelahan di beberapa bagian lereng lembah dan mempunyai ketinggian yang hampir sama, menunjukkan adanya gejala pemotongan sistem lorong bawah tanah oleh sesar. Lorong-lorong gua yang pernah aktif sebelum terjadi pengangkatan mempunyai arah hampir barat-timur (Samodra, 2003).

2.1.1.4 Karst

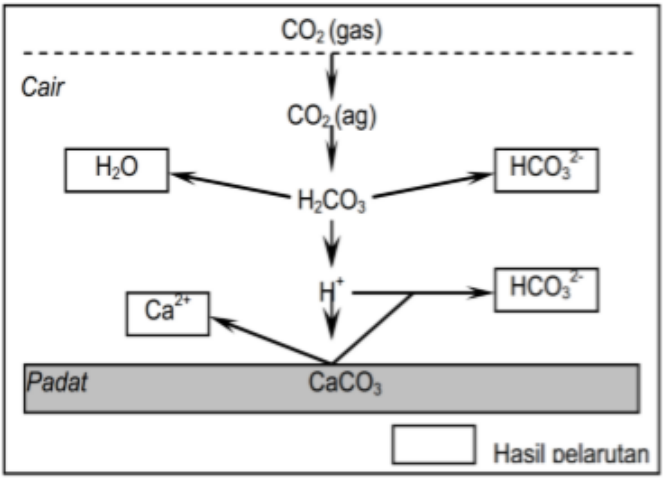
Karst sebagai medan dengan kondisi hidrologi yang khas sebagai akibat dari batuan yang mudah larut dan mempunyai porositas sekunder yang berkembang baik (Ford dan Williams, 1989). Karst dicirikan oleh:

a. terdapatnya cekungan tertutup dan atau lembah kering dalam berbagai ukuran dan bentuk,
b. langkanya atau tidak terdapatnya drainase/ sungai permukaan, dan
c. terdapatnya goa dari sistem drainase bawah tanah.

Karst tidak hanya terjadi di daerah berbatuan karbonat, tetapi terjadi juga di batuan lain yang mudah larut dan mempunyai porositas sekunder (kekar dan sesar intensif), seperti batuan gipsum dan batugaram.

Karstifikasi atau proses permbentukan bentuk-lahan karst didominasi oleh proses pelarutan. Secara ringkas proses pelarutan dirumuskan dengan reaksi sebagai berikut :

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2\ HCO^{3-} \quad (1)$$



Gambar 2. 4 Skema proses pelarutan batu gamping (Haryono dan Adji, 2017)

Karstifikasi dipengaruhi oleh dua kelompok faktor, faktor pengontrol dan faktor pendorong. Faktor pengontrol menentukan dapat tidaknya proses karstifikasi berlangsung, sedangkan faktor pendorong menentukan kecepatan dan kesempurnaan proses karstifikasi (Haryono dan Adji, 2017).

Faktor Pengontrol

a. Batuan mudah larut, kompak, tebal, dan mempunyai banyak rekahan
b. Curah hujan yang cukup (>250 mm/tahun)
c. Batuan terekspos di ketinggian yang memungkinkan perkembangan sirkulasi air/drainase secara vertikal.

Faktor pendorong

a. Temperatur
b. Penutupan hutan

Karst Pacitan batu gamping di daerah Pacitan (Jawa Timur) merupakan ujung paling timur dari kepanjangan sistem karst Gunung Sewu di Yogyakarta dan Wonogiri (Jawa Tengah). Dibatasi oleh Teluk Pacitan yang berbentuk melingkar, bentangalamnya dapat dibedakan menjadi segmen karst Pacitan Barat dan segmen Pacitan Timur. Segmen karst Pacitan Barat merupakan bagian dari sistem karst Gunung Sewu yang disebutkan sebelumnya, sementara karst di Pacitan Timur sudah bukan bagian dari sistem karst yang luas tersebut. Jika batugamping karst di Pacitan Barat masih memiliki ciri karst Gunung Sewu yang khas (bukit kerucut dan morfologi sisa-plato), maka sifat khas tersebut sudah jarang dijumpai di Pacitan Timur. Keadaan itu dipengaruhi oleh tataan geologi setempat. (Samodra, 2003)

Beberapa sungai permukaan di Pacitan Barat dan Pacitan Timur sering berubah menjadi sungai bawah tanah, untuk kemudian muncul lagi di permukaan setelah menghilang sepanjang ratusan meter. Sistem sungai bawah tanah khas yang berkembang di Gunung sewu lebih dangkal daripada di Gunung Kidul dan diduga berada di Vadose dan dikendalikan oleh pergerakan air dari permukaan yang masuk melalui patahan batuan (Bahri dkk., 2019). Tempat masuk dan ke luarnya aliran sungai adalah mulut-mulut sistem perguaan aktif. Gejala endokarst di Pacitan Barat diwakili oleh puluhan gua, yang mempunyai jenis dan dimensi beragam. Luweng Jaran di segmen ini dikenal sebagai gabungan antara sistem perguaan-tegak dan mendatar yang bercabang-cabang dan bertingkat-tingkat, dengan total panjang tidak kurang dari 18 km. Sungai bawah tanah yang keluar dari sistem perguaan ini, S. Cokel, akhirnya bermuara di Samudera Hindia yang hanya beberapa ratus meter dari lubang ke luaran yang berupa sifon. Sistem sumuran-tegak tunggal yang paling dalam di Pacitan Barat adalah Luweng Ombo, yang mempunyai kedalaman hampir 125 m. Segmen Pacitan Timur, yang lapisan batugampingnya lebih tipis, juga mempunyai gejala endokarst yang jumlahnya hampir sama dengan Pacitan Barat. Tetapi dari sisi dimensi, tidak ada sistem perguaan yang ukurannya seekstrim seperti di Pacitan Barat (Samodra, 2003).

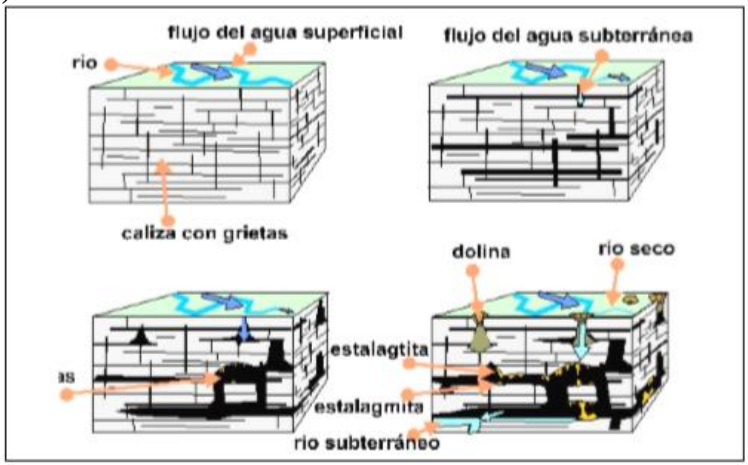
Masing-masing peneliti mengklasifikasikan karst Pacitan sebagai berikut (Haryono dan Adji, 2017) :

a. Berdasarkan perkembangan Cvijic (1914) mengklasifikasikan Pacitan termasuk dalam golongan Holokarst, yang mana karst tersebut mengalami perkembangan sempurna dari segi bentuk maupun hidrologi bawah permukaan.

b. Berdasarkan morfologi Gvozdeckij (1965) mengklasifikasikan Pacitan termasuk dalam golongan Bare karst, yang mana karst golongan ini dapat terlihat langsung atau tidak tertutup oleh batuan lainnya.
c. Berdasarkan iklim Sweeting (1972) mengklasifikasikan Pacitan termasuk dalam golongan Kegelkarst, yang mana dicirikan oleh kumpulan bukit-bukit berbentuk kerucut. Sela antar bukit membentuk cekungan seperti bintang. Cekungan tersebut disebut juga dengan cockpit, yang biasanya membentuk pola kelurusan akibat control kekar atau sesar.

2.1.1.5 Hidrologi Karst

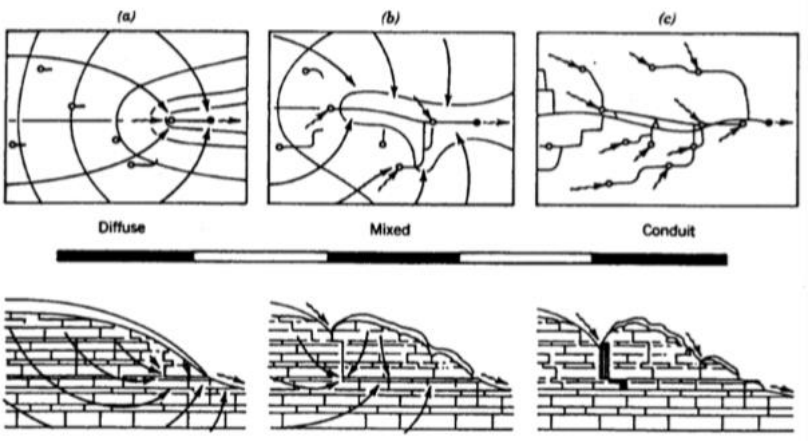
Salah satu ciri karst adalah adanya sistem drainase bawah tanah. Hal ini sesuai dengan Ford dan Williams (1989) yang mendefinisikan karst memiliki kondisi hidrologi yang khas akibat dari batuan yang mudah larut. Batuan yang ada pada daerah karst memiliki banyak rongga, sehingga mengakibatkan tidak berkembangnya sistem sungai permukaan namun menghasilkan sistem sungai bawah permukaan yang lebih dominan. Menurut Adji dan Suyono (2004), air yang terdapat pada batuan gamping bersifat dinamis, karena air tersebut bergerak dari permukaan sampai ke zona jenuh air. Berdasarkan jalur yang dilalui, pergerakan air ini berpotensi terjadinya pelarutan batuannya sehingga dalam jangka waktu tertentu terbentuklah lubang yang diameternya cukup besar, maka terbentuklah sistem sungai bawah permukaan di daerah karst (Haryono dan Adji, 2017).



Gambar 2. 5 Drainase bawah permukaan di daerah karst *(Sumber: http://www.eccentrix.com/members/hydrogeologie/hidrogeol/karst.gif)*

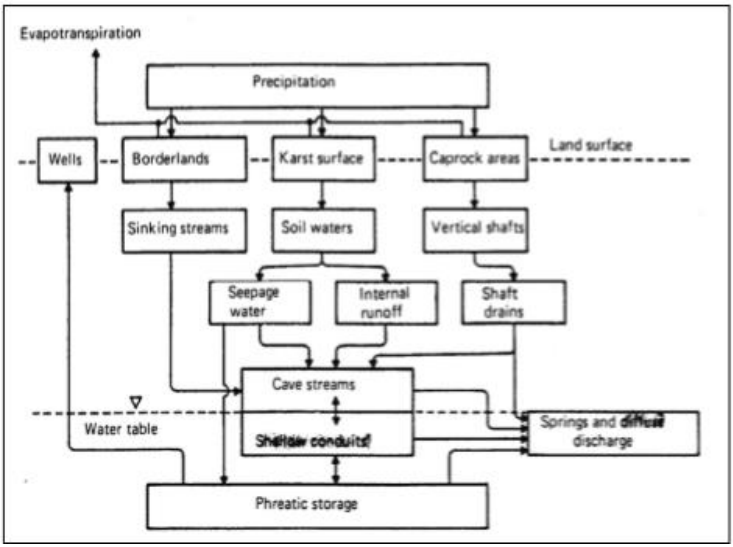
Jankowski (2001) mengatakan bahwa terdapat tiga komponen utama pada sistem hidrologi karst, yaitu: akuifer, sistem hidrologi permukaan, dan sistem hidrologi bawah permukaan. Secara umum batas antara DAS permukaan

dan bawah permukaan adalah tidak sama. Sistem bawah permukaan, terutama yang memiliki kemiringan muka airtanah yang rendah dapat mempunyai banyak jalur dan outlet (mata air). Selanjutnya, karena terus berkembangnya proses pelarutan, muka airtanah, mataair dan jalur sungai bawah tanah di akuifer karst juga dapat berubah-ubah menurut waktu (Haryono dan Adji, 2017).

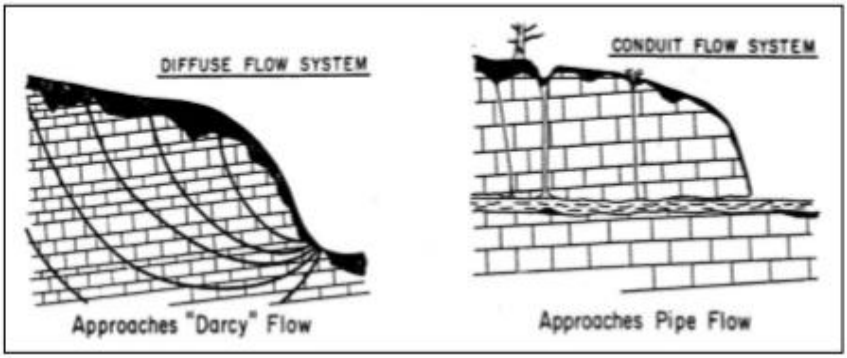


Gambar 2. 6 *Diffuse*, campuran dan *conduit* airtanah karst (Domenico dan Schwartz 1990) dalam (Haryono dan Adji, 2017)

White (1988) meneyebutkan dua hal ekstrim pada akuifer karst adalah adanya sistem *conduit* dan *diffuse* yang hampir tidak terdapat pada akuifer jenis lain. Ada kalanya suatu formasi karst didominasi oleh sistem *conduit* dan ada kalanya pula tidak terdapat lorong-lorong conduit tetapi lebih berkembang sistem *diffuse*, sehingga hanya mempunyai pengaruh yang sangat kecil terhadap sirkulasi airtanah karst. Tetapi, pada umumnya suatu daerah karst yang berkembang baik mempunyai kombinasi dua elemen tersebut. Menurut Gillison (1996) terdapat satu lagi sistem drainase di daerah karst yaitu sistem rekahan (*fissure*) (Haryono dan Adji, 2017).



Gambar 2. 7 Sistem aliran internal pada akuifer karst (White, 1988) dalam (Haryono dan Adji, 2017)



Gambar 2. 8 Sistem aliran *conduit* vs sistem aliran *diffuse* (White, 1988) dalam (Haryono dan Adji, 2017)

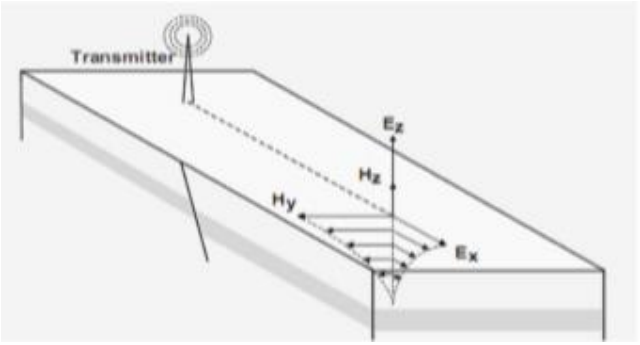
Gambar 2.7 menunjukkan bagian atas adalah permukaan tanah, dan diasumsikan memiliki tiga komponen daerah tangkapan air yaitu: dari formasi karst itu sendiri, daerah lain non-karst yang berdekatan (contoh: aliran *allogenic*), dan masukan dari bagian atas formasi karst (misal: sungai yang masuk/tertelan) atau masukan langsung secara vertikal. Sebagian hujan akan terevapotranspirasikan dan sisanya akan masuk ke akuifer karst sebagai limpasan *allogenic*, limpasan internal dan infiltrasi rekahan-rekahan kecil (*diffuse infiltration*). Hujan yang masuk harus menjenuhkan tanah dan zona

rekahan/epikarst sebelum masuk ke zona *vadose*. Sungai yang tertelan dan masuk melalui ponor pada lembah/dolina biasanya langsung membentuk lorong conduit dan dapat berkembang sebagai saluran terbuka atau pipa-pipa *vadose*. Selain itu, air yang dialirkan dari dari daerah tangkapan hujan atau dari akuifer yang bertengger diatas formasi karst (jika ada) biasanya akan langsung menuju zone vadose melalui lorong-lorong vertikal. Akhirnya, aliran tersebut dapat bergabung dengan lorong *conduit* dari masukan lain, dan ada pula yang menjadi mataair bila kondisi topografi memungkinkan. Ilustrasi perkembangan *conduit* disajikan pada Gambar 2.8.

Imbuhan yang mempunyai sifat *diffuse* bergerak secara seragam kebawah melalui rekahan-rekahan yang tersedia *(fissure)*. Jika sistem *diffuse* oleh *fissure* berkembang baik, maka dapat dipastikan bahwa proses infiltrasi pada zona epikarst berlangsung dengan baik. Daerah karst yang berkembang baik, fissure sudah menjadi satu sistem dengan *conduit* (*mixed*-Gambar 2.6) dan memasok aliran airnya ke lorong-lorong *conduit* (Haryono dan Adji, 2017).

2.1.2 Metode Very Low Frequency (VLF)

Metode *Very Low Frequency* (VLF) merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan komponen magnetik dari medan elektromagnet yang ditimbulkan oleh pemancar gelombang radio berfrekuensi sangat rendah yaitu berkisar antara 15 – 30 kHz. Gelombang menjalar melalui permukaan bumi sebagai gelombang tanah *(ground wave)* dan melalui lapisan ionosfer sebagai gelombang angkasa *(sky wave)* yang mengalami pemantulan dan pembiasan sehingga gelombang VLF mampu merambat sampai tempat yang jauh dari pemancar. Selanjutnya, pemancar VLF yang terletak di beberapa lokasi di seluruh dunia telah banyak digunakan sebagai sumber EM untuk pemetaan geologi dekat permukaan (Ramesh Babu dkk., 2007). (Paal, 1965) juga telah berhasil mengamati dari gelombang radio pada frekuensi VLF dapat digunakan untuk zona prospek konduktif dari deposit mineral. Metode VLF umumnya menghasilkan anomali EM yang cukup besar, bahkan pada konduktor yang buruk seperti kontak yang terpotong, zona fraktur, dan patahan. Oleh karena itu, metode ini telah menjadi alat paling populer untuk pemetaan cepat struktur geologi dekat permukaan (Parker, 1980).



Gambar 2. 9 Gelombang Elektromagnetik untuk metode *VLF* (Reynolds, 2011)

Metode VLF-EM memanfaatkan gelombang elektromagnetik (medan magnet dan medan listrik) yang berada di bumi. Medan elektromagnetik primer dari sebuah pemancar radio memiliki komponen medan listrik Ez dan komponen medan magnetic horizontal Hy yang tegak lurus terhadap arah perambatan sumbu x, sehingga bila jarak sebuah anomali yang bersifat konduktif cukup jauh dengan antena pemancar, maka komponen medan elektromagnetik primer Hy dianggap sebagai gelombang yang berjalan secara horizontal dan akan menginduksi anomaly sehingga akan menimbulkan arus induksi. Nilai arus induksi ini berbanding lurus dengan nilai konduktivitas dari suatu batuan.

Arus induksi ini nantinya akan menghasilkan medan magnet sekunder dengan frekuensi yang sama namun dengan fase yang berbeda. Sedangkan, nilai medan magnetik vertikal Hz berguna untuk menentukan anomali. Gelombang ini yang digunakan untuk mengetahui perbedaan konduktivitas bawah permukaan dengan memanfaatkan persamaan Maxwell. Secara teoritis dasar metode VLF menggunakan teori perambatan gelombang elektromagnetik dari persamaan Maxwell dalam bentuk hubungan vektor medan listrik dan medan magnetik, yaitu :

$\nabla . D = \rho_c$ Hukum Gauss (2)

$\nabla . B = 0$ Hukum Gauss (untuk magnetism) (3)

$\nabla x E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ Persamaan Maxwell-Faraday (induksi) (4)

$\nabla x H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$ Hukum Ampere (dengan koreksi Maxwell) (5)

dengan E adalah intensitas medan listrik (V/m), B adalah induksi magnetik (Wb/m^2), H adalah intensitas medan magnet (A/m), J adalah densitas arus (A/m^2) dan D adalah pergeseran listrik (C/m^2).

Persamaan diatas dapat direduksi dengan menggunakan hubungan-hubungan tensor tambahan sehingga diperoleh persamaan yang hanya berkaitan dengan medan E dan H saja (Grant dan West, 1965).
Jika diasumsi bahwa medan E dan H hanya sebagai fungsi eksponensial

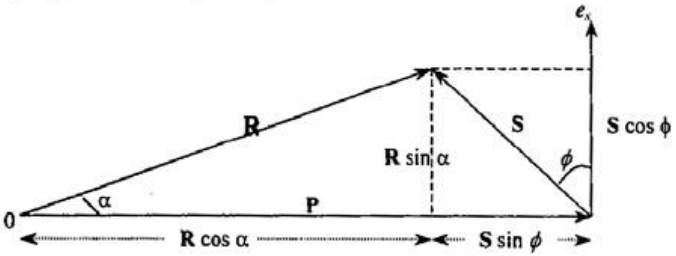
$$\nabla^2 E = \mathrm{i}\omega\mu\sigma\mathrm{E} - \omega^2\varepsilon\mu\mathrm{E} \quad (6)$$

$$\nabla^2 H = \mathrm{i}\omega\mu\sigma\mathrm{H} - \omega^2\varepsilon\mu\mathrm{H} \quad (7)$$

Persamaan (6) dan (7) adalah persamaan elektromagnetik untuk perambatan vektor medan listrik dan medan magnetik di dalam medium homogen isotrop dengan ε adalah permitivitas dielektrik (F/m), σ adalah konduktivitas listrik (S/m), dan μ adalah permeabilitas magnetik (H/m) (Telford dkk., 1990)

2.1.2.1 Fase dan Polarisasi Ellips

Saat gelombang primer masuk ke dalam medium, gaya gerak listrik (ggl) induksi akan muncul dengan frekuensi yang sama, tetapi fasenya tertinggal 90° (Kaikkonen, 1979). Gambar dibawah ini menunjukkan diagram vektor antara medan primer P dan ggl induksinya.



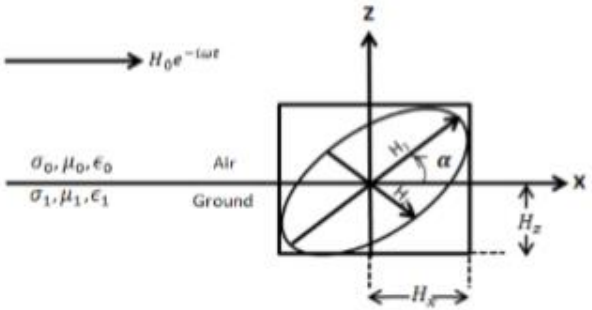
Gambar 2. 10 Hubungan amplitudo dan fase gelombang sekunder (S) dan primer (P) (Kaikkonen, 1979)

Jika medan magnet horizontal adalah Hx dan medan vertikalnya sebesar Hz, maka besar sudut tilt (α) :

$$\tan 2\alpha = \frac{\mathrm{HxHy}\cos\emptyset}{\mathrm{Hx}^2 - \mathrm{Hy}^2} = \frac{\frac{Hz}{Hx}\cos\emptyset}{1-\left(\frac{Hz}{Hx}\right)^2} \quad (8)$$

dan eliptisitas (ε) sebagai :

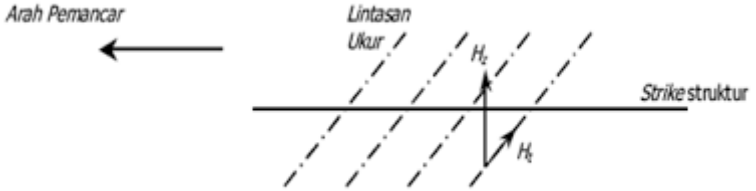
$$\varepsilon = \frac{H_2}{H_1} = \frac{\mathrm{HzHx}\sin\emptyset}{(H_1)^2} \quad (9)$$



Gambar 2. 11 Parameter polarisasi elips akibat benda konduktif pada bidang medan elektromagnetik (Saydam, 1981)

2.1.2.2 Mode Sudut Tilt

Mode *tilt-angle* (sudut tilt) digunakan untuk mengetahui struktur konduktif dan kontak geologi seperti zona alterasi, patahan, dan dike konduktif. Dalam mode ini, arah strike target memiliki sudut ±45° dengan lokasi pemancar. Konfigurasi pengukuran semacam ini, medan primer akan memberikan fluks yang maksimum jika memotong struktur, sehingga memberikan kemungkinan anomali yang paling besar (Indriyani dkk, 2014).



Gambar 2. 12 Desain Survey Mode Sudut Tilt (https://hmgf.fmipa.ugm.ac.id/2015/12/15/metode-very-low-frequency-vlf/)

Medan magnet yang memiliki komponen horisontal dan vertikal membentuk sebuah ellips yang dapat ditunjukkan dengan sudut tilt dari sumbu mayor dan sumbu horisontalnya, dan eliptisitasnya (perbandingan sumbu minor/sumbu mayor). Parameter pertama (sudut tilt) adalah yang paling umum digunakan. Parameter kedua (elliptisitas) terkadang digunakan untuk membedakan konduktor baik (nilai elliptisitas lebih rendah dari nilai tilt dan berbeda tanda) dengan konduktor buruk atau kontak geologi (nilai elliptisitas pada orde yang sama dan bertanda sama). Namun ini dapat tidak berlaku apabila terdapat *conductive overburden* (Indriyani dkk, 2014).

2.1.2.3 Instrumentasi (T-VLF)

Instrumentasi yang digunakan adalah alat T-VLF BRGM dari IRIS Instrument. T-VLF terdiri dari unit sensor dan T-unit. Unit sensor adalah penerima gelombang radio dengan jangkauan frekuensi 10-30 kHz. Dilengkapi dengan *automatic gain*, *digital filtering* dan *microprocessor* (kontrol pengukuran otomatis). Unit sensor terdapat 3 sensor magnetic X, Y dan Z yang saling tegak lurus satu sama lain dan 2 inklinometer pada sensor X dan Y untuk mengoreksi posisi miring. Sensor ini mampu mengukur 2 frekuensi secara bersamaan dan mendukung 2 mode pengukuran yaitu tilt mode dan *resistivity mode*.

T-unit merupakan *console display* yang fungsinya memberikan informasi data yang ditangkap oleh unit sensor. Data yang didapatkan adalah nilai tilt, elliptisitas, medan magnet horizontal, medan magnet vertikal, arah datang sinyal, dan kualitas sinyal dari dua transmitter yang digunakan. Data tersebut akan terbaca pada T-unit dengan masing-masing frekuensi. Unit *console* ini dapat menyimpan data hasil pengukuran hingga 4000 bacaan. Penghubung serial tersedia untuk transfer data dari T-unit ke komputer atau printer (Panduan Field Camp UGM, 2014)

2.1.2.4 Rapat Arus Ekivalen (RAE)

Rapat arus ekuivalen adalah arus yang menginduksi konduktor dan arus yang terkonsentrasi dalam konduktor dari daerah sekelilingnya yang kurang konduktif. Secara teori kedalaman semu rapat arus ekuivalen memberikan gambaran indikasi tiap-tiap kedalaman variasi konsentrasi arus. Asumsi untuk menentukan rapat arus yang menghasilkan medan magnetik yang identik dengan medan magnetik dari benda konduktif yang diukur. Persamaan filter linear (Karous dan Hjelt, 1983) adalah persamaan untuk menentukan rapat arus ekuivalen dan merupakan *filter* terpendek yang memberikan kesalahan kurang dari 8% untuk medan dari lintasan arus tunggal.

$$\frac{\Delta_z}{2\pi} I\alpha \left(\frac{\Delta_x}{2}\right) = -0.205\mathrm{H}_{-2} + 0.323\mathrm{H}_{-1} - 1.446\mathrm{H}_0 + 1.446\mathrm{H}_{+1} - 0.323\mathrm{H}_{+2} + 0.205\mathrm{H}_{+3} \quad (10)$$

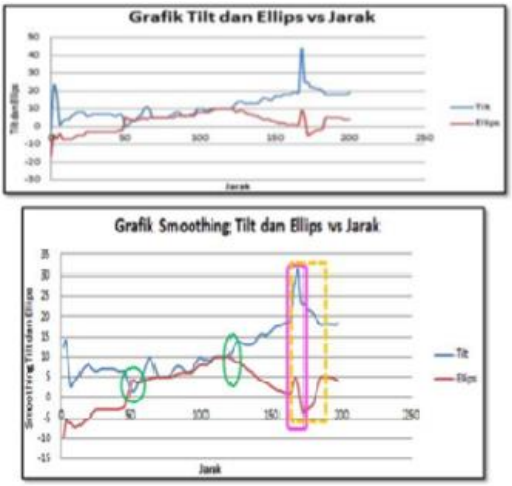
2.1.2.5 Filter Moving Average

Metode VLF data yang mengandung frekuensi tinggi diasumsikan sebagai sinyal, sedangkan data yang berfrekuensi rendah diasumsikan sebagai *noise. Filter moving average* adalah filter yang digunakan untuk menghilangkan noise yang bersifat lokal dengan memisahkan data yang mengandung frekuensi tinggi dan rendah. *Filter* ini dilakukan dengan cara merata-rata nilai anomalinya kemudian dibagi dengan jumlah jendela yang digunakan, atau secara matematis dapat ditulis sebagai berikut (Nabighian, 1991) :

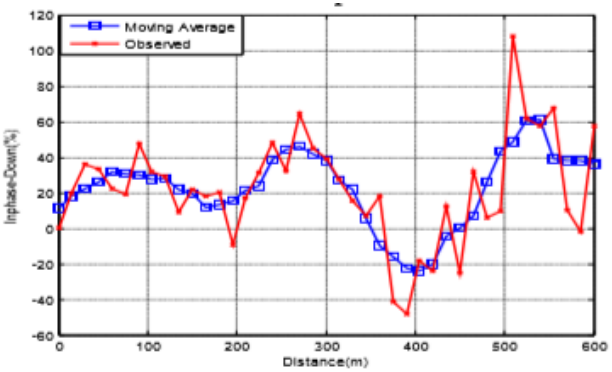
$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} x[i+j] \quad (11)$$

dimana $y[i]$ adalah sinyal output hasil *filter moving average*, $x[i + j]$ adalah sinyal input, dan M adalah orde filter. Nilai yang di filter dengan *moving average* adalah nilai jarak, tilt dan elliptisitasnya.

Contoh penerapan filter ini terlihat pada gambar di bawah. Gambar 2.13 memperlihatkan lingkaran hijau menunjukkan adanya *cross* antara tilt dengan ellips. Hal ini menunjukkan daerah yang lebih konduktif dibandingkan sekitarnya. Kotak kuning menunjukkan adanya pola ellips rendah dan anomali tilt yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa daerah ini merupakan konduktor yang baik, tetapi lapisan penutupnya resistif atau konduktor buruk. Kotak merah muda menunjukkan adanya pola dan tanda elips dan tilt yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa daerah merupakan konduktor buruk



Gambar 2. 13 Grafik Tilt dan Ellips vs Jarak Sebelum (atas) dan Setelah (bawah) Moving Average Pada Lintasan Ketiga (Indriyani dkk, 2014)



Gambar 2. 14 Filter Moving average dalam inphase-*down* data lintasan 1 (A Syaeful Bahri dan Si, n.d.)

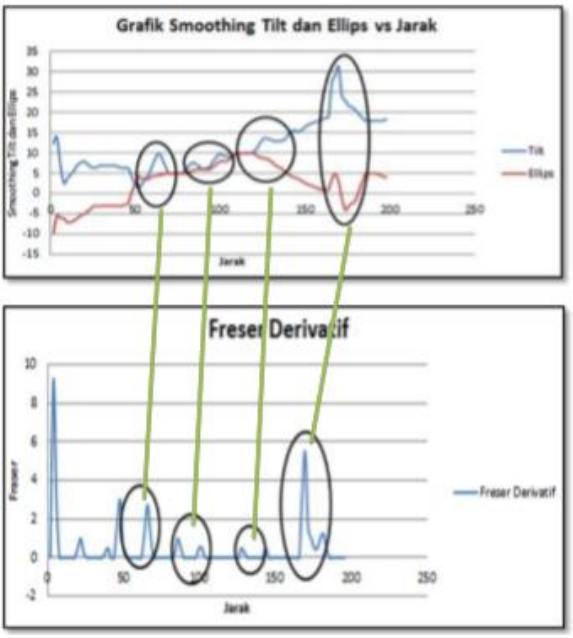
2.1.2.6 Filter Fraser

Filter Fraser adalah perangkat lunak yang berfungsi menyaring data di topografi. Filter Fraser diaplikasikan pada data tilt angle yang merupakan hasil polarisasi elipstik medan magnetik bawah permukaan. Filter ini, dihitung dengan menggunakan prinsip gradien horizontal dan penghalusan data untuk memberikan nilai maksimum pada benda yang lebih konduktif. Rumus *Filter* Fraser diberikan oleh fungsi.

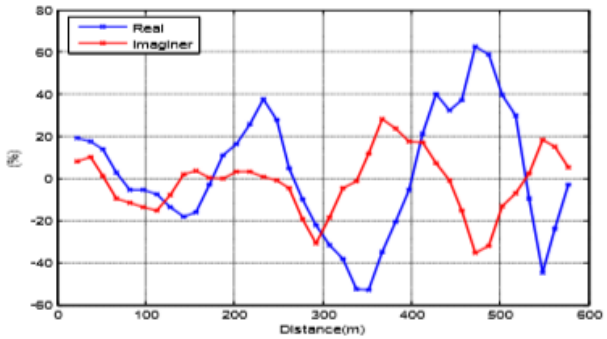
$$Fn = (M_{n+2} + M_{n+3}) - (M_n + M_{n+1}) \quad (12)$$

Penggunaan *Filter* Fraser dapat digunakan untuk melokalisir bahan yang lebih konduktif. Anomali yang dihasilkan dari *Filter* Fraser nampak lebih fokus dan tajam. Hasil ini, secara geologi dapat menunjukkan letak anomali yang konduktif dan resesif dengan lebih tepat (Maulidina, 2015).

Berikut gambar di bawah merupakan contoh dari penerapan filter fraser. Terdapat 2 contoh kasus yang berbeda pada gambar di bawah. Lingkaran hitam pada gambar 2.15 menunjukkan anomaly sedangkan garis hijau memperlihatkan korelasi antara grafik *smoothing* tilt dengan *fraser derivative*.



Gambar 2. 15 Hubungan Grafik Smoothing Tilt dan Ellips vs Jarak dengan Grafik Fraser Derivatif Pada Lintasan Ketiga (Indriyani dkk, 2014)



Gambar 2. 16 Filter Fraser diaplikasikan dalam data real (inphase) dan imaginer (quadrature) lintasan 1 *down* (Bahri dkk, 2010)

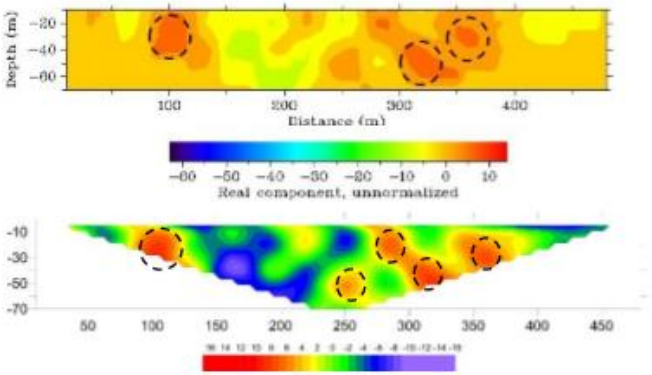
2.1.2.7 Filter Karous Hjelt

Filter Karous-Hjelt menghasilkan persebaran anomali bawah permukaan berdasarkan parameter rapat arus ekivalen. Hasil yang diperoleh dari filter ini berupa peta kontur 2 dimensi dengan kedalaman yang masih bersifat semu. Penerapan hasil filter ini berupa distribusi kerapatan arus yang dapat memberi informasi mengenai daerah konduktif. Pengolahaan data menggunakan filter Karous-Hjelt menggunakan persamaan berikut (Karous dan Hjelt, 1983) :

$$H_0 = 0.102M_n - 0.059M_{n+1} + 0.561M_{n+2} - 0.561M_{n+4} + 0.059M_{n+5} - 0.102M_{n+6} \quad (13)$$

dimana H_0 adalah sinyal output hasil Filter Karous Hjelt dan M_n adalah data ke-n.

Gambar di bawah ini merupakan penerapan dari filter Karous-Hjelt yang memperlihatkan penampang melintang RAE (Rapat Arus Ekivalen). Penampang tersebut menginformasikan daerah konduktif dan resistif dari daerah pengukuran. Lingkaran hitam dengan garis putus-putus menandakan anomali konduktif.



Gambar 2. 17 Hasil Filter Karous-HJelt (atas) dan penampang RAE *surfer* (bawah) lintasan VLF 10 (Wardhana, 2018)

2.1.2.8 Filter EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)

Mode mixing merupakan kelemahan EMD yang paling signifikan, yang menyiratkan satu IMF tunggal yang terdiri dari sinyal skala yang berbeda atau sinyal skala serupa yang muncul di berbagai komponen IMF, dan biasanya menyebabkan intermittency untuk menganalisis sinyal. Jika penguraian tersebut tidak sensitif terhadap suara tambahan amplitudo kecil tapi tipis dan hanya memiliki sedikit perubahan kuantitatif dan kualitatif, dekomposisi pada umumnya dianggap stabil dan memenuhi keunikan fisik; Jika tidak, dekomposisi tidak stabil dan tidak memenuhi keunikan fisik (Wu dan Huang, 2009 dalam

Suryani dan others, 2018). Secara umum, EMD tidak memenuhi persyaratan ini karena dekomposisi didasarkan hanya pada distribusi ekstrem.

Untuk mengatasi kekurangan masalah *mode mixing* yang ada di EMD, sebuah tes intermiten diajukan secara subjektif (Huang et al., 1996 dalam Suryani dkk, 2018), namun pengaruhnya tidak diantisipasi. Kemudian Wu dan Huang (Suryani dkk, 2018) mengusulkan sebuah *Ensemble* EMD (EEMD), sebuah metode analisis baru dengan bantuan noise, untuk menghilangkan fenomena *mode mixing* dan mendapatkan distribusi frekuensi sebenarnya dari sinyal asli. Prinsip sederhana EEMD yaitu: menambahkan *white noise* ke data, kemudian mendistribusikan secara merata ke seluruh ruang frekuensi, sinyal bit dari skala yang berbeda dapat dirancang secara otomatis ke skala referensi yang tepat yang ditentukan oleh *white noise*. Berikut adalah langkah-langkah metode EEMD *(Ensemble Empirical Mode Decomposition)* (Putra dkk., 2015) (Putra dkk., 2015) :

1. Penambahan *white noise* pada sinyal.
   $X(t) = x(t) + w(t)R$ (14)
   R ialah rasio standard deviasi antara amplitudo noise yang ditambahkan pada data x(t).
2. Dekomposisi data dengan penambahan *white noise* hingga komponen ke-n pada IMF. EEMD diaplikasikan X(t) untuk mendekomposisi data x(t) sehingga menghasilkan beberapa *Intrinsic Mode Function* (IMF) (c1 sampai cn) dan residu rn seperti yang tercantum pada persamaan 10.
3. Mengulangi langkah 1 dan 2 dengan melakukan penambahan *white noise* wj(t) ke sinyal x(t).
4. Menentukan nilai rata-rata IMF sebagai IMF akhir.

$c_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} c_{ij}$ (15)

Selain itu, juga dilakukan menentukan rata-rata rn sebagai tren akhir.

$r_n = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} r_{jn}$ (16)

Nilai c_i dan r_n dinyatakan sebagai hasil akhir dengan persamaan sebagai berikut:

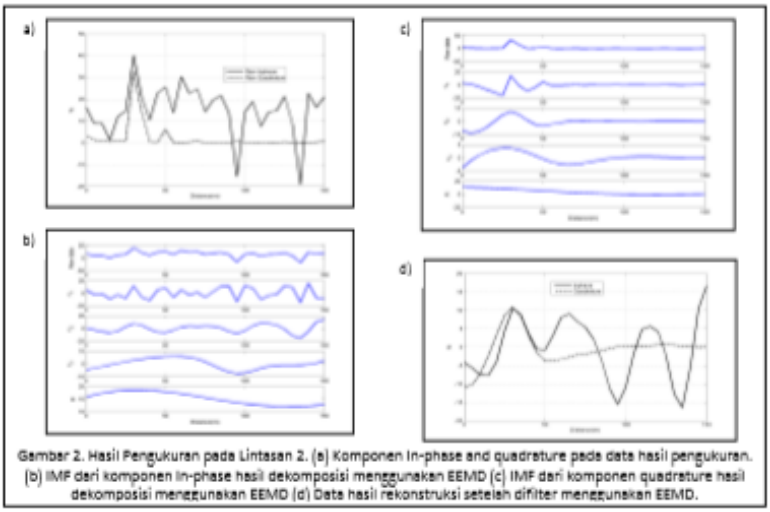
$x(t) = \sum_i^n c_i + r_n$ (17)

Kualitas data VLF-EM sering terganggu dengan berbagai *noise*, baik itu *noise* dari kondisi geologi yang menginduksi VLF-EM (Everett dan Weiss, 2002) dalam (Rochman, dkk., 2012) maupun *noise* dari gelombang EM sendiri. Semua noise rata-rata bersifat *non-linier*, oleh sebab itu akan sulit menghilangkannya dengan cara linier (konvensional). Untuk itu data VLF-EM diolah menggunakan *filter* EEMD ini agar dihasilkan sinyal yang bersih dari *noise* sehingga gambaran struktur bawah permukaan menjadi lebih baik. Untuk pemprosesan data yang paling baik dengan mengkombinasikan antara EEMD dan fraser, dapat dilihat lebih jelas dugaan anomalinya (Rochman, dkk., 2012)

Hasil penelitian menggunakan metode VLF dengan filter EEMD untuk memetakan struktur bawah permukaan Studi Kasus LUSI Sidoarjo (Rochman,

dkk., 2014) dan untuk memetakan fosfat di daerah Sukolilo (Rochman, dkk., 2012) menyatakan bahwa proses filter EEMD mampu meningkatkan kualitas data dan menghilangkan *noise*.

Gambar 2.18 memperlihatkan contoh filter EEMD. Mulai dari data hasil observasi hingga data hasil filter tersebut.



Gambar 2. 18 Contoh Penerapan Filter EEMD

2.1.2.9 Inversi

Menke (1984) menyebut teori inversi adalah suatu kesatuan teknik atau metode matematika dan statistika yang digunakan untuk memperoleh informasi mengenai suatu sistem fisika berdasarkan observasi. Pemodelan inversi merupakan kebalikan dari pemodelan ke depan *(forward modelling)* karena parameter model didapatkan dari data. Mekanisme dasar modifikasi model dalam pemodelan inversi dilakukan secara otomatis agar diperoleh kecocokan antara data perhitungan dengan dengan data pengamatan yang lebih baik. Pemodelan inversi disebut juga *data fitting* karena dalam prosesnya dicari parameter model yang menghasilkan respons yang *fit* dengan data pengamatan (Grandis, 2009).

Inversi pada medan elektromagnetik merupakan persamaan inversi *non-linear* dengan pendekatan linear yang berhubungan dengan data observasi dan parameter model. Hubungan data dan parameter model (tidak linear) dinyatkan dalam persamaan di bawah:

$$\Delta d = A\Delta \mathrm{m} \qquad (18)$$

dengan Δd selisih anatara model dengan data observasi, Δm merupakan selisih model awal m^k dengan model m^{k+1} yang adalah resistivitas batuan.

Permasalaha diatas dapat dipecahkan dengan meminimalisir fungsi objektif yang dinyatakan pada persamaan:

$$U = |W_d(A\Delta m - \Delta d)|^2 + \lambda\left[\left|Cm^{(k+1)}\right| + \alpha\left|W_m\left(m^{(k+1)} - m_b\right)\right|^2\right] \quad (19)$$

dimana W_d merupakan data matrik pembobot pada diagonal yang terdiri dari data standard deviasi atau data amplitude. C merupakan operator kedua perbedaan yang digunakan untuk mendefinisikan model kekasaran. W_m merupakan pembobotan diagonal berupa matrik yang digunakan untuk mengontrol kedekatan ke model awal (m_b) dan untuk mengurangi matrik identitas jika pembobot yang sama untuk semua parameter model. λ merupakan Lagrange multipler, sedangkan α merupakan kontrol relatif antara model *smoothness* dan *closeness* dengan model awal. Jika Persamaan (19) diminimumkan nilai error dengan syarat $\frac{\partial U}{\partial \Delta m} = 0$, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$(A^T W_d^T W_d A + \lambda C^T C + \lambda \alpha W_m^T W_m)\,\Delta m = A^T W_d^T W_d\,\Delta d - \lambda C^T C m^{(k)} + \lambda \alpha W_m^T W_m (m_b - m^{(k)}) \quad (20)$$

Persamaan diatas untuk Δm setara dengan solusi *least-square*.

$$\tilde{A}\Delta m = \Delta\tilde{d} \quad (21)$$

dimana:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} W_d A \\ \sqrt{\lambda} C \\ \sqrt{\lambda\,\alpha} W_m \end{bmatrix}, \Delta\tilde{d} = \begin{bmatrix} W_d \Delta d \\ -\sqrt{\lambda} C m^{(k)} \\ \sqrt{\lambda\,\alpha} W_m (m_b - m^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

dengan vektor Δm merupakan pertambahan m_k untuk mendapatkan parameter terbaru $m^{(k+1)}$. Dengan k banyaknya iterasi yang digunakan untuk mencapai ukuran misfit berkurang ke tingkat yang di tentukan. Sehingga Persamaan (22) merupakan persamaan yang berlaku hubungan linear antara data dan parameter model (Wijayanti, 2017).

Inversi dalam metode VLF-EM memiliki tujuan untuk memperoleh distribusi bawah permukaan bumi dari resistivitas listrik, menghasilkan respons yang sesuai dengan data lapangan dalam batas *data error* terendah (Santos dkk., 2006). Perangkat lunak yang digunakan dalam inversi ini adalah Inv2DVLF yang

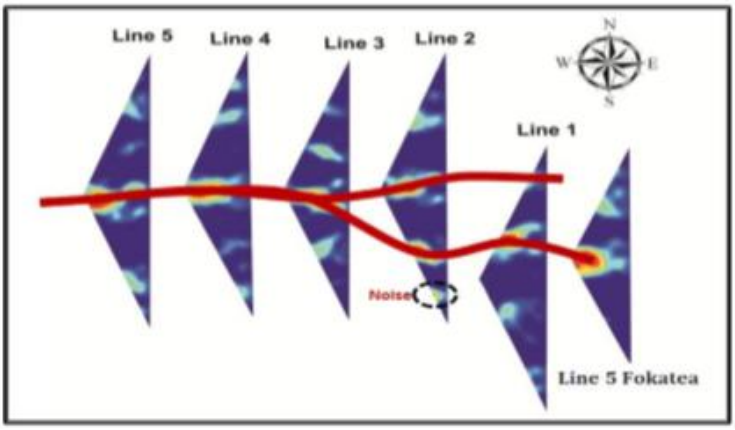
dapat menggambarkan bawah permukaan secara kuantitatif menggunakan frekuensi tunggal (Wijaya (2014) dalam (Wijayanti, 2017)). Inv2DVLF melakukan inversi menggunakan metode *least-square* dengan algoritma *finite element* (FEM). Ghufron (2010) dalam (Wijayanti, 2017) menyebut algoritma ini umumnya digunakan untuk menyederhanakan permasalahan numerik dengan hasil yang mendekati analitik.

Proses inversi data diawali menggunakan software PrepVLForw-v1 dengan meng-*input* file observasi (nama data, jumlah data, frekuensi pengukuran, dan data yang diperoleh), berikutnya data topografi setiap titik pengukuran dan yang terakhir memasukkan nama file hasil inversi. Hasil yang didapat akan menjadi masukan untuk proses inversi menggunakan software Inv2DVLF. Selanjutnya data *input* yang dimasukkan pada Inv2DVLF adalah jumlah iterasi yang dikehendaki (umumnya 15-30), parameter lagrange (umumnya 0.03) dan nilai *initial* resistivitas yang sesuai dengan daerah pengukuran. Inversi pada software Inv2DVLF mengatur letak mesh berupa inputan koordinat lingkungan dan koordinat anomali. Idealnya pengaturan mesh dipersempit untuk daerah-daerah yang dicurigai terdapat anomali. Namun pada pemodelan ini diasumsikan kita tidak mengetahui mengenai informasi adanya anomali sehingga dilakukan secara otomatis (Santos, 2006).

2.2 Penelitian Terdahulu

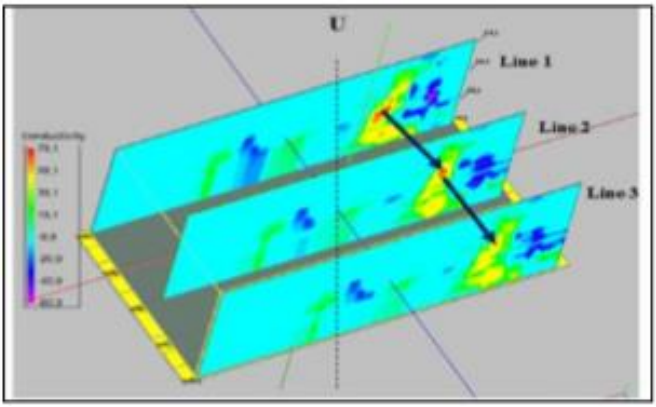
Penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini dan dijadikan sebagai referensi antara lain :

1. Ikmal Amrin, M Singgih Purwanto, Widya Utama, dan Ayi Syaeful Bahri pada tahun 2018 melakukan penelitian tentang identifikasi sistem sungai bawah tanah di daerah karst Pacitan menggunakan metode VLF. Hasil interpretasi Rapat Arus Ekivalen setiap Lintasan daerah penelitian, diindikasikan sebagai sistem sungai bawah tanah bernilai Rapat Arus Ekivalen Tinggi berkisar 4.07-13.96 yang tersebar pada kedalam 10-50 meter dengan arah timur ke barat. Nilai Rapat Arus Ekivalen sebanding dengan konduktivitas dan berbanding terbalik dengan resistivitas, nilai anomali tinggi dianggap sebagai rongga berisikan air.
2. Tahun 2017, Rahmat Faizal, Sismanto, Rosmalia Handayani, Asta meneliti tentang pendugaan aliran sungai bawah tanah di Desa Hargosari Gunungkidul berdasarkan data VLF-EM terkoreksi topografi. Hasil yang diperoleh berdasarkan interpretasi kualitatif dan kuantitatif dapat diketahui bahwa sungai bawah tanah Bribin mengalir dari arah timur menuju arah barat melewati Desa Hargosari, terdiri dari dua aliran sungai bawah tanah yang saling berhubungan. Lebar daerah konduktif (25 ± 5) m dengan kedalaman berkisar (148-184) m.



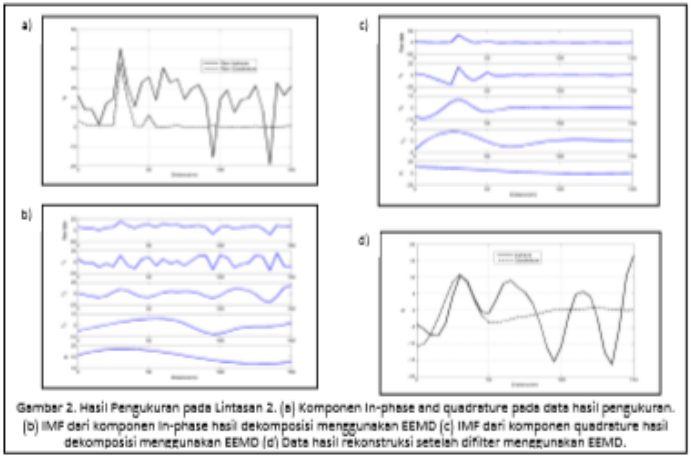
Gambar 2. 19 Hasil pengolahan Karous-Hjelt lintasan 1-5

3. Tahun 2014 dilakukan penelitian oleh Dita Dewi Indriyani dan Supriyadi tentang struktur lapisan bawah permukaan dan memetakan pola aliran sungai bawah tanah di daerah Karst Pracimantoro Kabupaten Wonogiri dengan menggunakan metode VLF. Hasil yang didapatkan ialah struktur lapisan bawah permukaan di daerah Karst Pracimantoro Kabupaten Wonogiri terdiri atas batugamping, batugamping napalan-tufan, batugamping konglomerat, batupasir tufan, dan batulanau. Sedangkan pola aliran sungai bawah tanah di daerah Karst Pracimantoro dengan menggunakan metode VLF (Very Low Frequency) arah alirannya menuju kearah timur lintasan kedua dan selanjutnya arah aliran lintasan kedua menuju kearah tenggara lintasan ketiga. Aliran air tersebut diduga yang nantinya akan dialirkan ke pantai selatan.



Gambar 2. 20 Penampang Hasil Pengolahan Software RockWorks

4. Penelitian yang dilakukan oleh Yekti Widyaningrum, A.M. Miftahul Huda dan Sungkono pada tahun 2018 bertujuan mengestimasi lokasi gorong-gorong di Kampus ITS Surabaya menggunakan metode VLF-EM dengan *filter* EEMD untuk meningkatkan kualitas data. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah EEMD merupakan metode aplikasi *(filter)* yang sesuai, stabil dan dapat dipercaya untuk merekonstruksi data tersebut sehingga didapatkan data yang lebih halus dan lebih baik. Hasil interpretasi *filter* Karous-Hjelt menunjukkan bahwa anomali bawah permukaan terdapat pada 25-35 meter dari titik mengukuran awal dan kedalaman 3-6 meter. Anomali tersebut menyatakan lokasi gorong-gorong di lokasi pengukuran.



Gambar 2. Hasil Pengukuran pada Lintasan 2. (a) Komponen in-phase and quadrature pada data hasil pengukuran. (b) IMF dari komponen in-phase hasil dekomposisi menggunakan EEMD (c) IMF dari komponen quadrature hasil dekomposisi menggunakan EEMD (d) Data hasil rekonstruksi setelah difilter menggunakan EEMD.

Gambar 2. 21 Salah satu data lintasan VLF sebelum dan sesudah dilakukan filter EEMD

BAB III METODOLOGI

3.1 Waktu dan Tempat

Waktu pengerjaan tugas akhir ini selama 16 minggu. Akuisisi tugas akhir dilakukan di Desa Sekar, Kecamatan Donerejo, Kabupaten Pacitan. Pengolahan dan pembuatan laporan dikerjakan di Departemen Teknik Geofisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Waktu pengerjaan tugas akhir ini selama 16 minggu.

3.2 Lokasi Penelitian

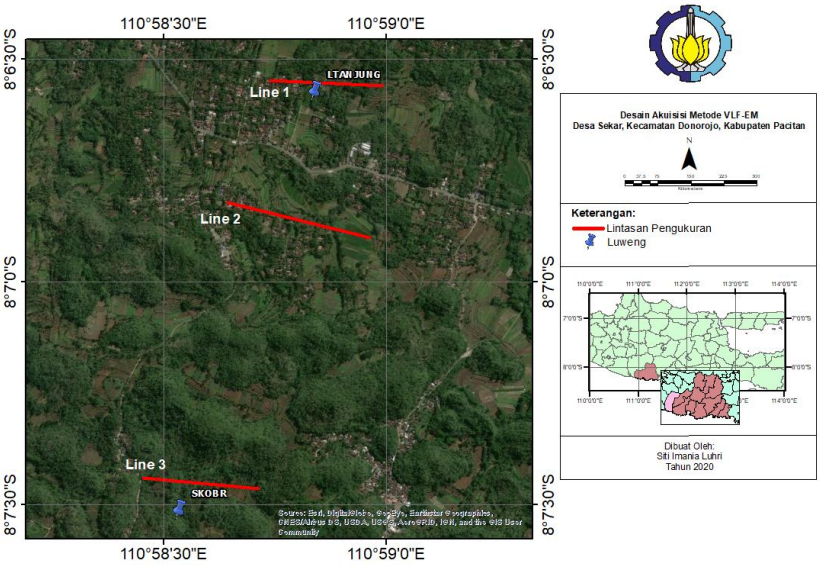
Lokasi penelitian ini terletak di Desa Sekar, Kecamatan Donorejo, Kabupaten Pacitan. Lokasi penelitian ini termasuk dalam bentang alam karst dan mempunyai sistem sungai bawah permukaan yang ditandai dengan adanya beberapa gua vertikal (luweng). Penelitian kali ini akuisisi data dilakukan dengan 3 lintasan masing-masing spasi tiap lintasan 10 meter. Rincian 3 lintasan dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 3. 1 Koordinat lintasan pengukuran

No.	Lintasan	Koordinat Awal		Koordinat Akhir		Panjang lintasan (m)
		Latitude	Longitude	Latitude	Longitude	
1	L 1	-8.109124°	110.97902°	-8.109355°	110.983187°	350
2	L 2	-8.113695°	110.977416°	-8.115036°	110.982725°	550
3	L 3	-8.124001°	110.974254°	-8.124404°	110.978544°	425

3.3 Desain Akuisisi

Berikut ini adalah desain akuisisi dari penelitian. Koordinaat awal berada di timur dan koordinat akhir dibagian barat untuk semua lintasan. Manifestasi Luweng Tanjung berada pada Line 1 sedangkan Luweng Koboran berada pada Line 3. Pemilihan desain akuisisi dengan arah dan jumlah lintasan seperti itu dikarenakan adanya 2 manifestasi pada daerah penelitian sehingga tidak memerlukan lintasan dalam jumlah banyak, didukung juga dengan lintasan dari metode Resistivitas. Arah lintasan disesuaikan dengan asumsi aliran sungai bawah tanah yang mengalir menuju ke selatan (pantai) dan hasil pengolahan penampang lintasan yang vertikal agar dapat diintegrasi untuk identifikasi kemenerusannya dari semua lintasan.



Gambar 3. 1 Desain Akuisisi Penelitian

3.4 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dari akuisisi sampai pengolahan data antara lain adalah :

a. Perangkat Keras

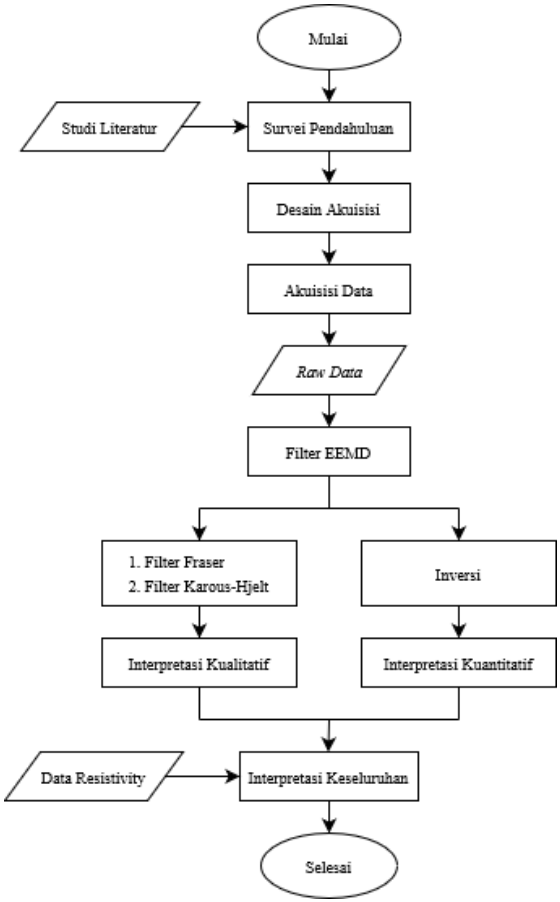
a. Satu set VLF-T
b. Satu unit laptop
c. Kompas geologi
d. GPS
e. *Clinometer*
f. Parang

b. Perangkat Lunak

a. *Microsoft Office Excel*
b. *Surfer*
c. VLF2DINV
d. *Arc GIS*
e. *Google Earth*

3.5 Diagram Alir Penelitian

Berikut di bawah ini merupakan diagram alir *(flowchart)* dari penelitian.



Gambar 3. 2 Diagram alir penelitian

3.6 Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Tahap Survei

   Tahapan awal persiapan penelitian ini membutuhkan antara lain peta geologi untuk mengetahui formasi dan jenis batuan yang menyusunnya, peta topografi untuk mengetahui ketinggian dan medan daerah penelitian serta peta lokasi untuk mengetahaui letak daerah penelitian.

2. Desain Akuisisi

Pembuatan desain akuisisi dilakukan dengan pengambilan foto citra satelit dari *google earth* kemudian dibuat peta desain akuisisi dengan *software ArcGIS.*

3. Akuisisi Data
   Pengambilan data dilakukan dengan alat-alat yang disebutkan diatas berdasarkan desain akuisisi yang telah dibuat. Hasil dari akuisisi data dicatat pada *datasheet.* Data yang didapatkan adalah nilai tilt, ellips, medan magnet horizontal dan medan magnet vertikal.
4. Pengolahan Data
   Pertama-tama *raw data* hasil pengukuran di-*filter* menggunakan *filter* EEMD dengan *software* MATLAB. Lalu dilanjutkan dengan pengolahan data kualitatif dilakukan dengan filter *fraser* dan Karous-Hjelt pada *Microsoft Office Excel* kemudian dibuat penampang Rapat Arus Ekivalensi (RAE) pada *software Surfer*. Sedangkan pengolahan data secara kuantitatif digunakan inversi dengan *software* VLF2DINV.
5. Interpretasi Data
   Interpretasi data dilakukan dengan hasil dari data yang telah di-*filter* melalui pengolahan data kuantitatif dan kualitatif kemudian digunakan data resistivitas untuk mengkonfirmasi/mendukung. Data resistivitas yang dimaksud disini ialah data dan penampang hasil pengukuran lintasan pada daerah penelitian yang sama.
6. Kesimpulan
   Setelah semua tahapan selesai, dilakukan korelasi terhadap ketiga lintasan ditambah dengan validasi dari data geolistrik resistivity.

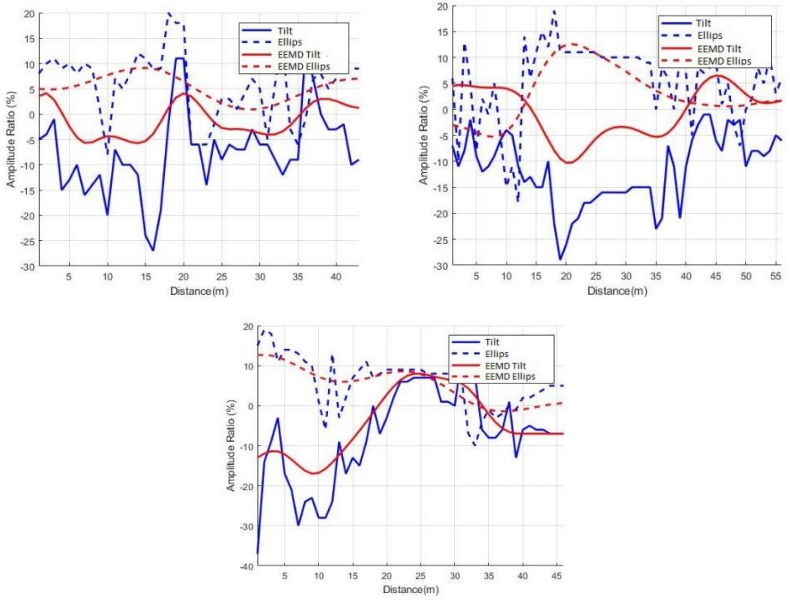
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan data dari frekuensi 2 (F2) yaitu 19800 Hz. Jika dibandingkan dengan data frekuensi 1, data dari frekuensi 2 setelah dilakukan inversi memiliki galat/*error* yang lebih kecil yaitu 0.3-0.8. Kualitas data diketahui setelah pengolahan data inversi yang menghasilkan galat/*error* (Sungkono dkk., 2017)

4.1 Analisis Hasil Pengolahan Data

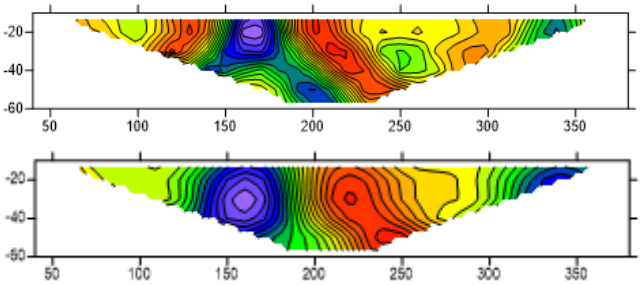
4.1.1 Analisis Hasil Pengolahan Filter EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)

Data VLF hasil akusisi terlebih dahulu diolah menggunakan filter EEMD. Fungsi dari filter ini adalah menghilangkan noise dari data VLF sehingga menghasilkan data VLF yang lebih halus dan anomali konduktifnya terlihat lebih jelas.

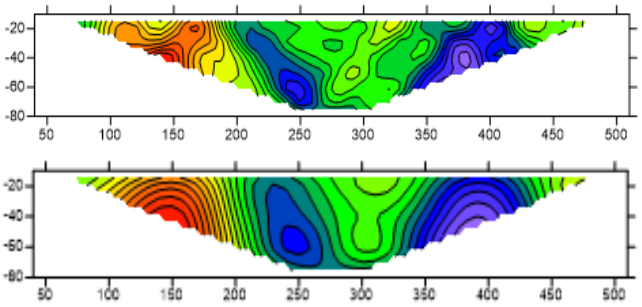


Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Ketiga Lintasan Data Akuisisi dengan Data yang sudah di-filter EEMD. Grafik Lintasan 1 (kiri atas), Grafik Lintasan 2 (kanan atas) dan Grafik Lintasan 3 (bawah tengah).

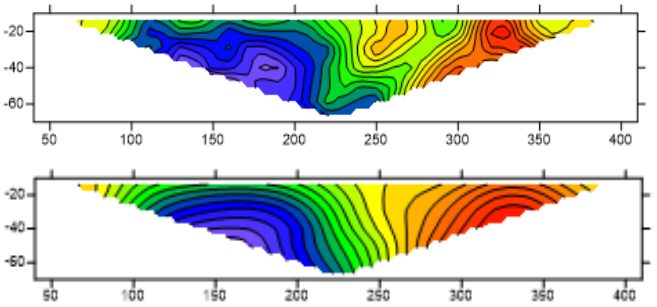
Berdasarkan gambar yang diatas pada setiap lintasan, grafik sebelum dilakukan filter EEMD (data akuisisi lapangan) terlihat naik turun tidak beraturan dan terdapat banyak anomali lokal (grafik naik/bukit), sehingga sulit untuk diinterpretasi anomali yang sesungguhnya. Sedangkan setelah di-filter menggunakan filter EEMD, data akuisisi lapangan tersebut menjadi lebih halus dan anomali lokal yang sebelumnya ada tidak terlihat lagi, meskipun tidak merubah data asli akuisisi karena tetap terlihat mengikuti pola data. Terlihat jelas data lapangan yang sudah di-filter lebih halus dibandingkan dengan data akuisisi lapangan sebelum di-filter. Hal ini memudahkan interpretasi karena menunjukkan anomali yang cukup jelas. Seperti yang ada pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 2 Perbandingan penampang RAE lintasan 1 tanpa filter EEMD (atas) dengan menggunakan filter EEMD (bawah)



Gambar 4. 3 Perbandingan penampang RAE lintasan 2 tanpa filter EEMD (atas) dengan menggunakan filter EEMD (bawah)

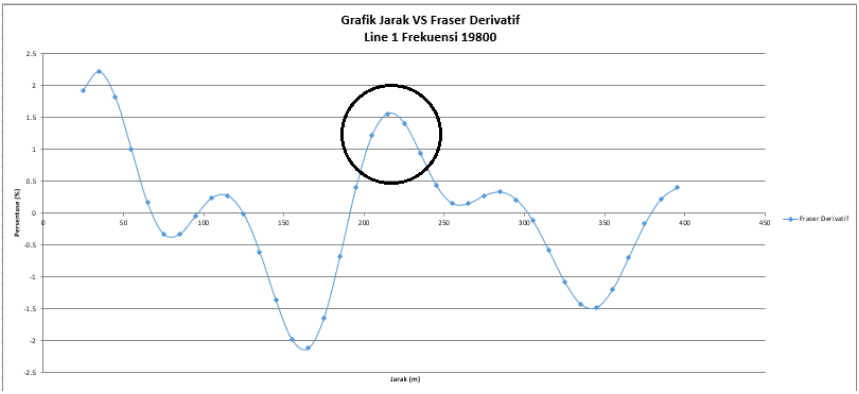


Gambar 4. 4 Perbandingan penampang RAE lintasan 3 tanpa filter EEMD (atas) dengan menggunakan filter EEMD (bawah)

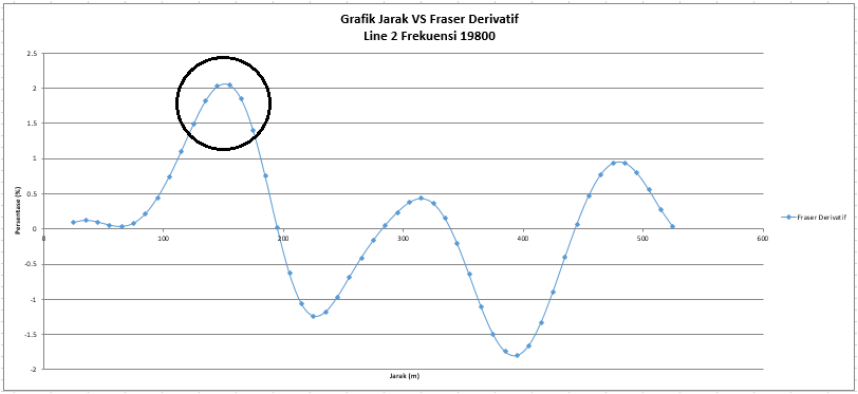
Penampang RAE sebelum dilakukan filter EEMD terlihat kompleks karena kontur yang banyak dan rapat, sedangkan setelah di-filter penampang terlihat lebih sederhana dengan kontur yang lebih sedikit dibandingkan dengan sebelum di-filter. Meskipun begitu, anomali konduktivitas yang ditandai dengan warna merah dan kontur warna lain terlihat sama letaknya. Setelah dilakukan filter ini, kontur menjadi lebih renggang dan terlihat jelas. Jika dibandingkan dengan grafik data pada gambar sebelumnya, data yang telah di-filter EEMD menjadi halus. Hal tersebut terlihat baik dari grafik maupun hasil penampang RAEnya.

4.1.2 Analisis Hasil Pengolahan Filter Fraser

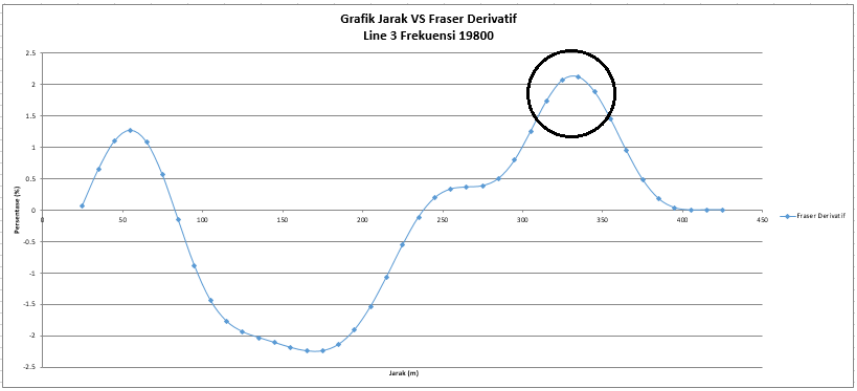
Filter fraser digunakan dalam pengolahan data VLF untuk menentukan letak anomali konduktif dan besarnya berdasarkan grafik. Nilai tilt dan panjang lintasan merupakan parameter yang membentuk grafik fraser. Anomali konduktifitas ditandai dengan bentuk grafik yang seperti gunung (ditandai oleh lingkaran hitam) sedangkan anomali resistivitas ditandai dengan bentuk grafik seperti lembah. Filter ini merupakan hasil dari pengolahan data kualitatif.



Gambar 4. 5 Grafik Fraser lintasan 1 (anomali konduktif ditandai oleh lingkaran hitam)



Gambar 4. 6 Grafik Fraser lintasan 2 (anomali konduktif ditandai oleh lingkaran hitam)



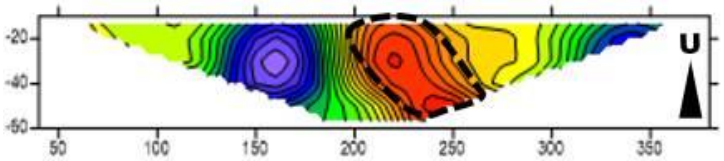
Gambar 4. 7 Grafik Fraser lintasan 3 (anomali konduktif ditandai oleh lingkaran hitam)

Sumbu y pada grafik tersebut merupakan nilai tilt hasil pengukuran yang telah di-*filter* EEMD terlebih dahulu, sedangkan sumbu x merupakan panjang lintasan pengukuran. Nilai tilt yang tinggi direpresentasikan dengan anomali konduktif sehingga letaknya dapat diketahui dari panjang lintasan. Gambar diatas menunjukkan anomali konduktifnya ditandai dengan lingkaran hitam. Terlihat pada lintasan 1 (Gambar 4.5) anomali konduktif berada pada meter ke-230. Jarak 50 meter juga terdapat anomali konduktif tetapi tidak begitu jelas karena grafik yang terpotong sehingga informasinya menjadi kurang, walaupun begitu ada kemungkinan anomali tersebut lebih konduktif daripada yang ditunjukkan oleh lingkaran hitam, hanya saja lintasan pengukuran tidak mencakup daerah tersebut. Lintasan 2 (Gambar 4.6) anomali konduktifnya berada dimeter ke-150, terlihat juga ada anomali konduktif yang lebih kecil pada jarak 500 meter. Akan tetapi anomali yang diambil untuk diintegrasi dengan hasil pengolahan lainnya adalah anomali yang lebih konduktif daripada daerah disekitarnya yaitu anomali yang berjarak 150 meter. Lintasan 3 (Gambar 4.7) anomali terlihat berada pada meter ke-340, walaupun terlihat juga anomali konduktif pada jarak 50 meter. Sama halnya seperti 2 lintasan sebelumnya, anomali konduktif yang digunakan dalam integrasi adalah anomali yang lebih (paling) konduktif daripada wilayah di sekitarnya.

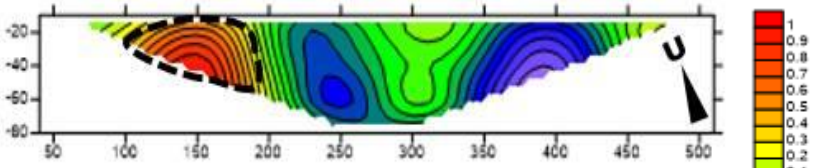
4.1.3 Analisis Hasil Pengolahan Filter Karous-Hjlet (KHjelt)

Pengolahan data kualitatif setelah filter fraser adalah filter KHjlet. Filter ini menghasilkan peta persebaran Rapat Arus Ekivalen (RAE) berdasarkan jarak dan kedalaman. RAE memberikan informasi daerah yang merupakan anomali

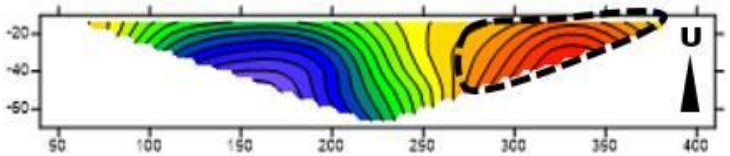
konduktif. Hasil dari filter KHjelt ini bukanlah nilai dari konduktivitas yang sebenarnya, karena filter ini merupakan pengolahan data yang bersifat kualitatif. Nilai RAE yang ada menunjukkan daerah yang lebih konduktif dari daerah sekitarnya. Artinya nilai konduktifitas dari hasil pengolahan tersebut bersifat lokal (hanya pada lokasi penelitian) dan bisa berbeda pada daerah yang lainnya.



Gambar 4. 8 Penampang RAE lintasan 1



Gambar 4. 9 Penampang RAE lintasan 2



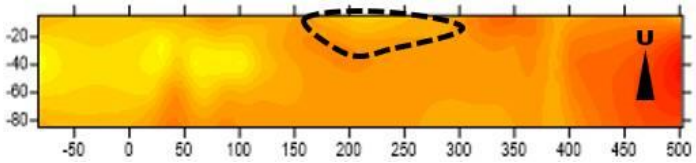
Gambar 4. 10 Penampang RAE lintasan 3

Hasil pengolahan data dengan filter KHjlet terlihat pada gambar di atas. Masing-masing lintasan pengukuran menunjukkan adanya anomali konduktif yang ditandai dengan kontur berwarna merah. Terlihat pada lintasan 1 (Gambar 4.8) anomali konduktif terdapat pada jarak 200-250 meter dengan kedalaman kurang lebih 55 meter, lintasan 2 (Gambar 4.9) anomali konduktifnya terdapat pada jarak 100-200 meter dengan kedalaman 45 meter dan lintasan 3 (Gambar 4.10) dengan kedalaman 40 meter terdapat anomali konduktif di meter ke 300-350.

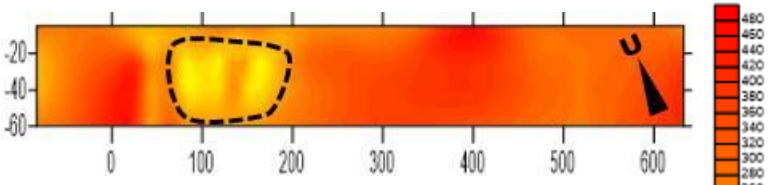
4.1.4 Analisis Hasil Pengolahan Inversi

Inversi merupakan pengolahan data yang bersifat kuantitatif. Pada metode VLF, inversi menunjukkan persebaran nilai resistivitas yang sebenarnya

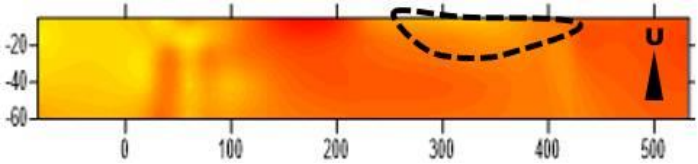
berdasarkan data akuisisi. Penampang resistivitas inversi akan dibandingkan dengan penampang RAE dari hasil filter KHjelt untuk menganalisis kesesuaian antara anomali konduktifitas tinggi dengan nilai resistivitas yang ada.



Gambar 4. 11 Penampang resistivitas lintasan 1



Gambar 4. 12 Penampang resistivitas lintasan 2



Gambar 4. 13 Penampang resistivitas lintasan 3

Hasil inversi dari ketiga lintasan masing-masing memiliki RMS error yaitu 0.3, 0.7, 0.8 berturut-turut dari lintasan 1 sampai lintasan 3 dengan iterasi maksimal 12. Penampang model resistivitas sebagaimana diperlihatkan di atas warnanya bervariasi dari kuning hingga merah. Nilai resistivitas tinggi ditandai dengan daerah berwarna merah dan nilai resistivitas rendah ditandai dengan daerah berwarna kuning. Konduktivitas berbanding terbalik dengan resistivitas, sehingga anomali konduktivitas tinggi besesuaian dengan resistivitas rendah pada hasil inversi. Jika dilihat pada gambar di atas, lintasan 1 (Gambar 4.11) terlihat resistivitas rendah bernilai 150-250 Ohm.m pada jarak 200-250 meter di kedalaman 30 meter berkaitan dengan anomali konduktif pada penampang RAE. Terlihat juga anomali resistivitas rendah pada jarak 50-100 meter bernilai 20-80 Ohm.m yang berkaitan dengan anomali konduktifitas tinggi pada hasil *filter* fraser di jarak yang sama. Lintasan 2 (Gambar 4.12) anomali resistivitas rendah sangat mencolok pada 100-200 meter di kedalaman kurang lebih 50 meter 20-60

Ohm.m. Hal tersebut bersesuaian dengan anomali konduktivitas tinggi dari penampang RAE. Pada kedalaman 30 meter di lintasan 3 (Gambar 4.13) terdapat anomali resistivitas rendah bernilai 120-200 Ohm.m yang juga berkaitan dengan anomali konduktif penampang RAE di meter ke 300-350. Anomali resistivitas rendah lain yang terlihat di lintasan 3 terdapat pada jarak 50 meter, hal ini berkaitan dengan anomali konduktifitas tinggi hasil pengolahan *filter* fraser dengan jarak yang sama. Fenomena anomali resistivitas rendah yang terlihat mencolok pada lintasan 1 dan 3 ini juga diduga juga merupakan anomali lain yang juga terdapat pada hasil pengolahan *filter* fraser. Tetapi, anomali tersebut tidak terlihat pada hasil pengolahan *filter* KHjelt kemungkinan dikarenakan penampang dari hasil *filter* tersebut yang tidak mencakup bagian yang ditunjukkan oleh hasil pengolahan *filter* fraser dan inversi. Oleh sebab itu anomali yang diproses untuk diintegrasi dan diinterpretasi untuk semua hasil pengolahan ditandai dengan garis hitam.

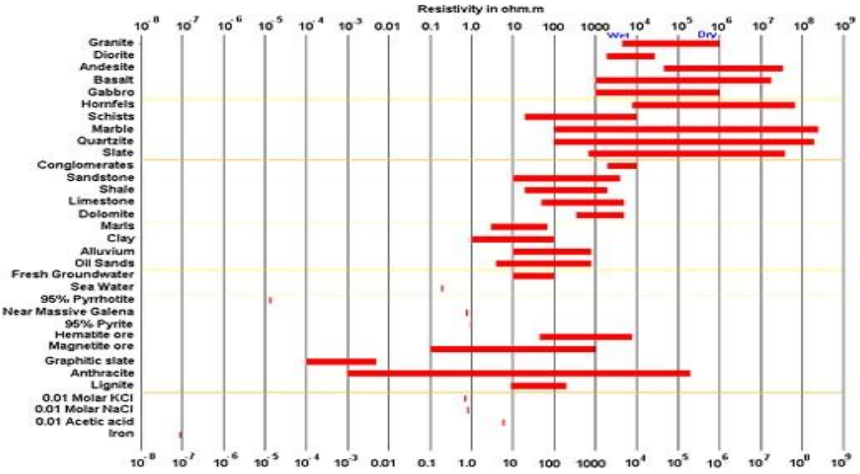
4.2 Analisis Pembahasan

4.2.1 Analisis Kemenerusan Sungai Bawah Permukaan

Pengolahan data metode VLF dengan *filter* EEMD yang telah dilakukan yaitu secara kualitatif menghasilkan penampang RAE dan secara kuantitatif menghasilkan penampang resistivitas. Data hasil pengolahan *filter* EEMD dapat dilihat hasilnya pada gambar 4.1 sedangkan hasil penampang RAE pada gambar 4.2-4.3. Gambar tersebut menjelaskan bahwa data sebelum dan sesudah di-*filter* dengan *filter* EEMD *noise* menjadi berkurang sehingga sangat terlihat perbedaannya. Setelah di-*filter* dengan EEMD, data menjadi lebih halus yang ditandai dengan amplitudo-amplitudo data yang tidak menukik tajam dan grafik yang menjadi lebih terstruktur sehingga anomali dapat dibedakan dengan jelas (*noise* direduksi). Selain itu juga hasil penampang RAE menunjukkan anomali yang dapat terlihat jelas setelah di-*filter* dengan EEMD, tidak banyak kontur yang memisah. Hal tersebut menjadi bukti bahwa *filter* EEMD mampu meningkatkan kualitas data dan menghilangkan *noise* (Rochman, dkk., 2012).

Kedua model pengolahan menghasilkan angka yang divisualisasikan dengan software Surfer 11. Penampang RAE (pengolahan kualitatif) menunjukkan konduktifitas rendah hingga tinggi (ditunjukkan dengan warna biru-merah) sedangkan penampang resistivitas yang dihasilkan oleh pengolahan inversi (kuantitatif) menunjukkan nilai resisitivitas rendah hingga tinggi (ditunjukkan warna kuning-merah). Anomali yang dicari adalah anomali konduktifitas tinggi yang berbanding terbalik dengan anomali resistivitas rendah. Hal tersebut

dikarenakan kandungan air di dalam batuan dapat meningkatkan konduktivitas batuan dan resisitivitas batuan sangat bergantung pada kandungan air di dalamnya (Telford dkk., 1990). Analisis dilakukan dengan mengamati hasil pengolahan data, penelitian terdahulu, kondisi geologi dan manifestasi yang ada.



Gambar 4. 14. Rentang Nilai Resisitivitas Batuan (Loke, 2015)

Lintasan 1 VLF terdapat anomali konduktifitas tinggi (ditunjukkan warna merah) dari penampang RAE dan hasil inversinya menunjukkan daerah tersebut terdapat anomali resistivitas rendah (berwarna kuning) bernilai 150-250 Ohm.m. Kedalaman dari anomali koduktifitas tinggi VLF sampai dengan 55 m dan anomali resistivitas rendah hasil inversi menunjukkan kedalaman kurang lebih 20 m. Anomali itu diduga merupakan sungai bawah permukaan. Dugaan tersebut didukung dengan adanya Luweng Tanjung yang berada di jarak 100an meter dri titik awal lintasan dan merupakan manifestasi di area lintasan tersebut.

Lintasan 2 VLF pada meter ke 100-200 kedalaman 45 m terdapat anomali konduktifitas tinggi (ditunjukkan warna merah) hasil dari pengolahan kualitatif, sedangkan pengolahan kuantitatif (inversi) menghasilkan nilai resistivitas 20-60 Ohm.m di kedalaman 40 m dengan jarak yang sama. Kedalaman antara hasil pengolahan kualitatif dan kuantitatif bisa dikatakan kurang lebih sama. Target anomali konduktifitas tinggi yang berkaitan dengan resistivitas rendah hasil inversi mengindikasikan bahwa anomali tersebut adalah aliran sungai bawah tanah yang terletak dimeter awal lintasan 2.

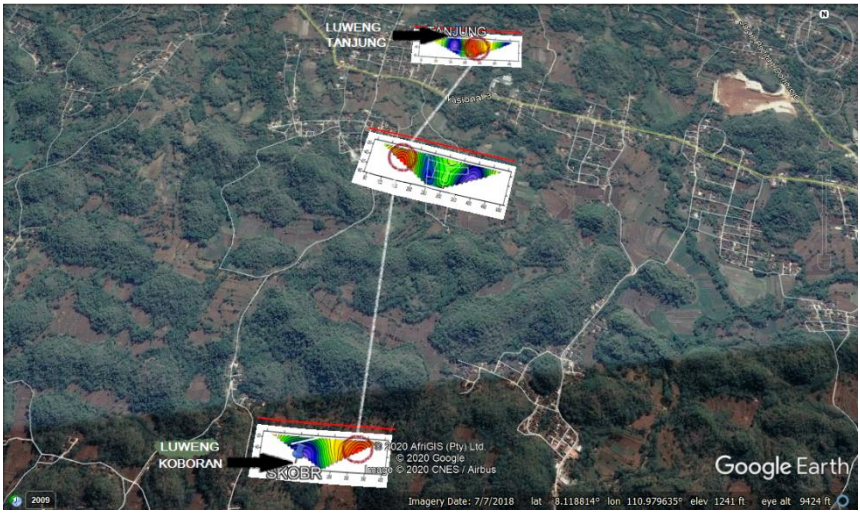
Anomali yang terlihat dari hasil pengolahan VLF pada lintasan 3 terletak pada 300-350 m dengan kedalaman 20 meter untuk hasil kualitatif dan

kuantitatifnya dengan nilai resistivitas 120-200 Ohm.m di meter yang sama. Target anomali ditunjukkan warna merah yang berarti konduktifitas tinggi diindikasikan merupakan sungai bawah permukaan yang didukung oleh manifestasi Luweng Koboran berjarak 30 meter pada arah selatan lintasan. Rentang nilai resistivitas dari ketiga lintasan di daerah karst diidentifikasi termasuk ke dalam air bawah tanah atau batugamping baik yang mengalami proses pelarutan maupun terisi oleh air berdasarkan tabel Loke (2015) pada Gambar 4.14 dan William E. Kelly dan Stanislav Mares dalam Kuswanto (2005). Metode kualitatif VLF menunjukkan anomali yang lebih atau paling konduktif daripada wilayah disekitarnya dan air merupakan benda yang sangat konduktif. Oleh sebab itu diasumsikan sungai bawah permukaan yang diidentifikasi berisi air.

Ketiga lintasan anomali diidentifikasi sebagai sungai bawah permukaan. Hal tersebut dikarenakan lokasi penelitian berada di daerah karst yang mana banyak terdapat sungai bawah permukaan sebagai sistem sungainya (Ford dan Williams, 1989). Selain itu interpretasi juga didukung oleh manifestasi Luweng Tanjung dan Luweng Koboran yang terdapat di dua lintasan pengukuran dari ketiga lintasan. Luweng (lubang) dan rekahan batuan menjadi tempat mengalirnya air (masuk dan keluarnya aliran sungai) secara vertikal. Pergerakan air berpotensi mengakibatkan pelarutan batuan sehingga dalam jangka waktu tertentu membentuk lubang yang semula kecil menjadi besar. Pacitan Barat yang merupakan daerah tempat penelitian dilakukan, memiliki gejala eksokarst dan endokarst. Gejala endokarst diwakili oleh puluhan gua (Luweng) yang memiliki dimensi beragam (Samodra, 2003), sementara gejala eksokarst dapat dilihat secara kasat mata, yaitu bukit-bukit batu gamping. Wilayah yang merupakan Subzona Gunung Sewu dari Zona Pegunungan Selatan ini memiliki ciri eksokarst yang membentang sepanjang Parangtritis-Pacitan. Batuan karbonat yaitu batu gamping yang terdapat pada daerah penelitian memiliki banyak rongga sehingga sungai permukaan tidak berkembang. Hal tersebut mengakibatkan air yang terdapat di daerah karst bersifat dinamis, karena air terus bergerak dari permukaan sampai ke zona jenuh air (Haryono dan Adji, 2017)

Hasil interpretasi dari ketiga lintasan pegukuran diduga sungai bawah permukaan terdapat pada kedalaman 20-40 m berdasarkan anomali konduktifitas tinggi (resisitivitas rendah pada pengukuran inversi). Hal tersebut sesuai dengan penelitian Bahri dkk., (2019) bahwa sistem sungai bawah tanah yang berkembang di daerah Gunung sewu lebih dangkal daripada Gunung Kidul dan diduga berada di zona *vadose* dan dikendalikan pergerakan air dari permukaan

yang masuk melalui batuan. Sekeliling daerah penelitian yang adalah lingkungan karst juga banyak terdapat dolina-dolina (cekungan) yang merupakan zona lemah juga struktur pendukung sungai bawah tanah. Dolina ini menjadi tempat rembesan air untuk kemudian dialirkan secara vertikal ke bawah permukaan tanah melalui *ponor* dan berkumpul membentuk sistem sungai bawah tanah. Hal tersebut dapat mengakibatkan terbentuknya lorong conduit dan kemudian berkembang menjadi *vadose*. Conduit merupakan salah satu jenis sistem pada akuifer daerah karst. Tetapi dilihat dari klasifikasi oleh Cvijic, daerah ini termasuk dakam akuifer sistem *mix* (*conduit* dan *diffuse*) karena mengalami perkembangan yang sempurna.



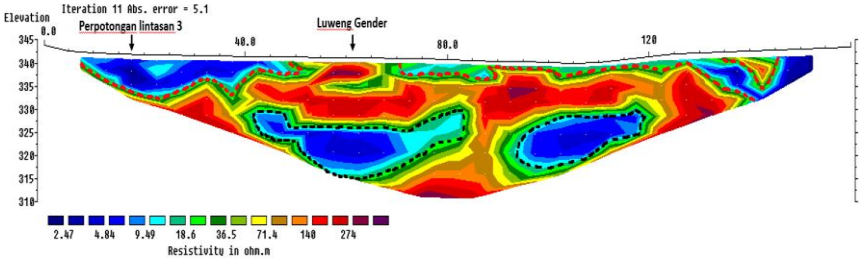
Gambar 4. 15 Kemenerusan Anomali yang terlihat di Ketiga Lintasan

Setelah dianalisis dan ditarik garis dari masing-masing anomali di tiap lintasan, terlihat bahwa aliran sungai bawah tanah menerus dari Luweng Tanjung ke Luweng Koboran. Arah aliran sungai bawah permukaan tersebut adalah timur laut-barat daya dengan azimuth 15º SW . Daerah penelitian ini terdapat sesar yang berperan mengontrol pola/arah aliran sungai bawah permukaan di daerah Pacitan. Hal ini juga dijelaskan dalam penelitian (Aliyan, 2018) bahwa sesar obrik sinistral Klanden dan sesar geser sinistral Barong merupakan faktor pengontrol pola aliran sungai yang berarah timur laut-barat daya. Patahan/sesar mengakibatkan rekahan pada batuan disekelilingnya yang apabila didorong oleh tenaga endogen menjadi menerus lebih jauh dan lebar. Setelah beberapa lama rekahan tersebut melebar dan diikuti oleh proses pelarutan menjadi semakin

besar hingga dapat membentuk lubang/gua vertikal (Luweng). Selain itu, batu gamping yang terdapat pada daerah penelitian merupakan batuan yang mudah larut dan memiliki porositas sekunder (kekar dan sesar) sehingga menjadikannya faktor pengontrol pembentukan kawasan karst.

4.2.2 Integrasi dengan Metode Resistivitas

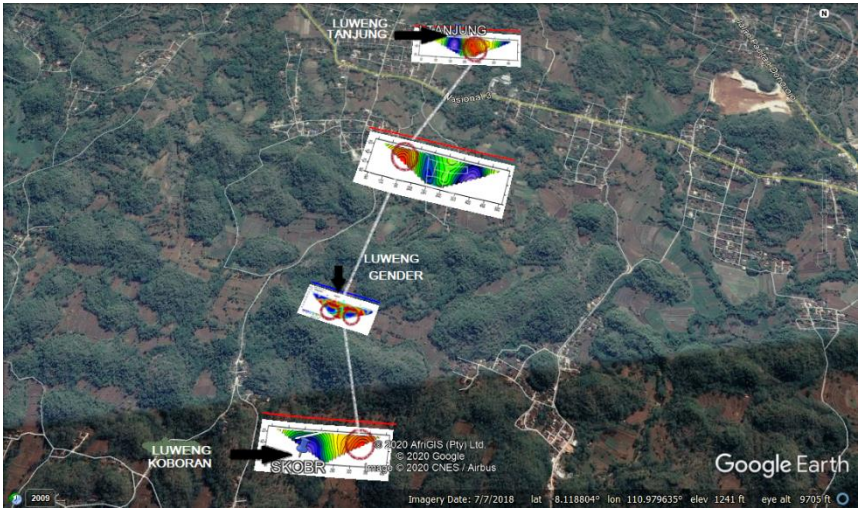
Berdasarkan penelitian Tobing (2020) terdapat 2 anomali resistivitas rendah yang ada pada daerah penelitian (berada diantara lintasan 2 dan 3 VLF). Anomali pertama terdapat di kedalaman 15-30 m pada jarak 40-80 m. Hal ini didukung oleh manifestasi Luweng Gender yang berada pada jarak 62 meter dari awal lintasan yang berada di barat. Target anomali resistivitas rendah diduga merupakan air yang terkumpul dari aliran vertikal Luweng Gender. Anomali kedua terdapat pada jarak 93-120 meter dengan kedalaman 18-30 meter. Kedua anomali menunjukkankan nilai resistivitas 2.47-9 Ohm.m.



Gambar 4. 16 Hasil Pengolahan Lintasan 2 Metode Resistivitas. Anomali ditandai dengan garis-garis berwarna hitam (Tobing, 2020).

Adanya anomali resisitivitas rendah pada metode resisitivitas diindikasikan merupakan kemenerusan aliran dari Luweng Tanjung menuju ke arah manifestasi Luweng Koboran. Selain itu, didukung juga dengan adanya manifestasi Luweng Gender yang ada pada lintasan resistivitas. Hal itu menyebabkan semakin kuat dugaan kemenerusan aliran sungai bawah permukaan dari Luweng Tanjung ke Luweng Koboran. Pada gambar 4.17 tampak kemenerusan aliran sungai bawah permukaan dari Luweng Tanjung ke arah Luweng Koboran. Terlihat kemenerusan dari Luweng Gender agak melenceng dari arah sebelumnya, walaupun jika ditarik garis antara anomali lintasan 3 ke arah Luweng Koboran maka arahnya kembali ke barat daya hal tersebut diduga diakibatkan oleh aliran air yang mengikuti zona lemahnya yang berada di timur lintasan 3 VLF, kemudian mengalir lagi ke Luweng Koboran.

Manfestasi luweng koboran juga dapat disebut sungai, karena adanya arus air yang tedengar disana. Sungai yang terdapat di manifestasi ini diduga muncul saat musim hujan, tersingkap dan kemudian hilang tertelan masuk menuju bawah permukaan melewati celah/rekahan atau luweng yang ada.



Gambar 4. 17 Dugaan Kemenerusan Aliran Sungai Bawah Tanah Metode VLF dan Resistivitas

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dan interpetasi Metode VLF dengan *filter* EEMD dapat disimpulkan bahwa

1. Aliran sungai bawah permukaan menerus dari Luweng Tanjung sampai ke Luweng Koboran dengan arah aliran timur laut-barat daya azimuth 15 SW.
2. Hasil interpretasi menunjukkan sungai bawah tanah berisi air diduga terdapat pada kedalaman 20-40 m dengan nilai resistivitas 20-250 Ohm.m.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah :

3. Lintasan penelitian lebih banyak agar data yang dihasilkan semakin akurat
4. Pengambilan data dilakukan dengan memenuhi kaidah yang ada pada alat
5. Menggunakan koreksi topografi dalam mengolah data agar dihasilkan target yang lebih akurat

DAFTAR PUSTAKA

Amrin, I., Purwanto, M.S. dan Si, S. (2018), IDENTIFIKASI KEMENERUSAN SISTEM SUNGAI BAWAH TANAH DAERAH KARST MENGGUNAKAN METODE VERY LOW FREQUENCY (VLF) DI KUNIRAN, PACITAN., hal. 89.

Anon (2014), Buku Panduan Field Camp UGM.

Bahri, A S, Hardyani, P.V., Utama, W., Hilyah, A., Purwanto, M.S. dan Fajar, M.H.M. (2019), "Controlling Factors of Underground River System of Karst Region in Pacitan Regency, East Java", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol.311, hal. 012033. http://doi.org/10.1088/1755-1315/311/1/012033.

Bahri, A Syaeful dan Si, S. (2010), PEMETAAN SUNGAI BAWAH PERMUKAAN DI WILAYAH KARS SEROPAN GUNUNGKIDUL MENGGUNAKAN METODA GEOFISIKA VLF-EM-vGRAD, hal. 8.

Bronto, S. dan Hartono, H. (2001), "Panduan Ekskursi Geologi Kuliah Lapangan 2", STTNAS, Yogyakarta.[Indonesian],.

Coppo, N., Schnegg, P., Defago, M., Mudry, I., Savoy, L. dan Zqahlen, F. (2006), "Mapping a shallow large cave using a high-resolution very low frequency electromagnetic method", Proceedings of the 8th Conference on Limestone Hydrogeology: Université de Franche-Comté, hal. 71–74,.

Dr.M.H. Loke (2015), Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys,.

Ford, D.C. dan Williams, P.W. (1989), Karst geomorphology and hydrology, Unwin Hyman London.

Grandis, H. (2009), "Pengantar pemodelan inversi geofisika", Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI),.

Grant, F.S. dan West, G.F. (1965), Interpretation theory in applied geophysics, McGraw-Hill Book.

Haryono, E. dan Adji, T.N. (2017a), Geomorfologi dan hidrologi karst,.

Haryono, E. dan Adji, T.N. (2017b), GEOMORFOLOGI DAN HIDROLOGI KARST, INA-Rxiv. Diambil dari https://osf.io/7jtgx.

Indriyani, D.D. dan others (2014), PEMETAAN DISTRIBUSI ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH MENGGUNAKAN METODE GEOFISIKAVLF (VERY LOW FREQUENCY) DAERAH KARST PRACIMANTORO KABUPATEN WONOGIRI, PhD Thesis, Universitas Negeri Semarang.

Kaikkonen, P. (1979), "Numerical VLF modeling", Geophysical Prospecting, Vol.27, No.4, hal. 815–834.

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.
Karunia, D.N. (2012), Identifikasi Pola Aliran Sungai Bawah Tanah Di Daerah Mudal, Gebangharjo, Pracimantoro Dengan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner-Schlumberger,.
Kuswanto, A. (2005), "Aplikasi Metoda Res-2d untuk Eksplorasi Air Bawah Tanah di Daerah Kars", Jurnal Air Indonesia, Vol.1, No.2.
Lehmann, H. (1939), "Factors influencing the formation of Robison ester", Biochemical Journal, Vol.33, No.8, hal. 1241.
Maulidina, M. (2015), Analisa struktur bawah permukaan tanah di sekitar Candi Gambar Wetan, Kabupaten Blitar dengan metode Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM), PhD Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
Menke, W. (1984), Geophysical data analysis. Discrete inverse theory. Academic press, New York, 312 p,.
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, No.2, hal. 115–125. http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.01.002.
Nabighian, M.N. (1991), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B: Volume 2, Application, Parts A and B, Society of Exploration Geophysicists.
Paal, G. (1965), "Ore prospecting based on VLF-radio signals", Geoexploration, Vol.3, No.3, hal. 139–147.
Parker, M. (1980), "VLF-ELECTROMAGNETIC MAPPING OF STRATA-BOUND MINERALIZATION NEAR ABERFELDY, SCOTLAND", TRANSACTIONS OF THE INSTITUTION OF MINING AND METALLURGY SECTION B-APPLIED EARTH SCIENCE, Vol.89, No.MAY, hal. B123–B129.
Putra, T.M.K., Utama, W. dan Jaya, M.S. (2015), "Aplikasi Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) pada Sinyal Mikroseismik untuk Identifikasi Dinamika Hidrotermal Bawah Permukaan, Studi Kasus Daerah Potensi Geotermal Gunung Lamongan Jawa Timur", Jurnal Geosaintek, Vol.1, No.1, hal. 1–8.
Ramesh Babu, V., Ram, S. dan Sundararajan, N. (2007), "Modeling and inversion of magnetic and VLF-EM data with an application to basement fractures: A case study from Raigarh, India", Geophysics, Vol.72, No.5, hal. B133–B140.
Reynolds, J.M. (2011), An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons.
Rochman, J.P.G.N, Bahri, A.S, Hariyanto, T dan Anjasmara, I.M (2014), APLIKASI METODE VLF-EM UNTUK MEMETAKAN

STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN TANAH (STUDI KASUS LUSI PORONG SIDOARJO), Vol.5.

Rochman, J.P.G.N, Bahri, A.S, Santosa, B.J dan Ghufron (2012), Aplikasi Ensemble Empirical Mode Decomposition(EEMD) Pada Data VLF-EM vGrad Untuk Memetakan Fosfat Di Daerah Sukolilo Pati Jawa Tengah,.

Samodra, H. (2003), Nilai strategis kawasan kars di indonesia dan usaha pengelolaannya secara berkelanjutan (*), hal. 1–170.

Samodra, H., Gafoer, S. dan Tjokrosapoetro, S. (1992), "Peta Geologi Lembar Pacitan, Jawa, skala 1: 100.000", Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung,.

Santos, F.A.M. (2006), Instructions for Running PrepVLF and Inv2DVLF 2-D Inversion of VLF-EM Single Frequency Programs, hal. 12.

Saydam, A.S. (1981), "Very low-frequency electromagnetic interpretation using tilt angle and ellipticity measurements", Geophysics, Vol.46, No.11, hal. 1594–1605.

Silmi Afina Aliyan dan Syaeful Bahri (2018), Identifikasi Kontrol Struktur Geologi Terhadap Pola Aliran Sungai Bawah Permukaan Di Kawasan Karst Pringkuku, Pacitan, ITS Surabaya.

Sismanto (2002), Uji Alat dan Metode Geofisika Terpadu Terhadap Sungai Bawah Tanah di Goa Bribin, Semanu, Wonosari, Gunungkidul, Yogyakarta,.

Sungkono, Santosa, B.J., Bahri, A.S., Santos, F.M. dan Iswahyudi, A. (2017), "Application of Noise-Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition in VLF-EM Data to Identify Underground River", Advances in Data Science and Adaptive Analysis, Vol.09, No.01, hal. 1650011. http://doi.org/10.1142/S2424922X1650011X.

Surono, T. (1992), "B., dan Sudarno, I., 1992", Peta Geologi Lembar Surakarta-Giritontro, Jawa, Skala, Vol.1, No.100.000.

Suryani, P.E. dan others (2018), "PERBANDINGAN METODE EEMD DAN EMD UNTUK MEREDUKSI NOISE PADA SINYAL SEISMIK", Jurnal Ilmiah Teknosains, Vol.4, No.1, hal. 47–55.

Telford, W.M., Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R.E. dan Sheriff, R. (1990), Applied geophysics, Cambridge university press.

Van Bemmelen, R. (1949), The geology of Indonesia 1A (The Hague: Government Printing Office),.

Wardhana, F.S. (2018), IDENTIFIKASI KEMENERUSAN SISTEM SUNGAI BAWAH PERMUKAAN KAWASAN KARST DERSONO PACITAN DENGAN METODE VLF-EM, hal. 93.

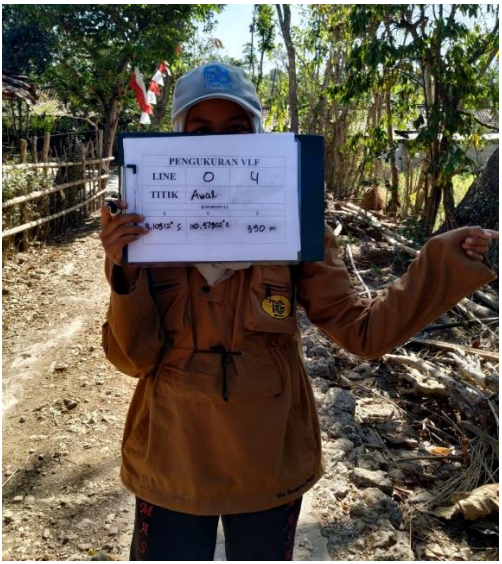
Widyaningrum, Y., Huda, A.M. dan Sungkono, S. (2018), "Aplikasi Filter EEMD Untuk Meningkatkan Kualitas Data VLF-EM Studi Kasus: Estimasi Lokasi Gorong-Gorong Di Kampus ITS Surabaya", Jurnal Geosaintek, Vol.4, No.3, hal. 123–130.

Wijayanti, N. (2017), PEMETAAN ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH DI DAERAH RENGEL-TUBAN DENGAN MENGGUNAKAN METODE VERY LOW FREQUENCY- ELECTROMAGNETIC (VLF-EM), hal. 105.

LAMPIRAN

Gambar 1. Luweng Koboran 1

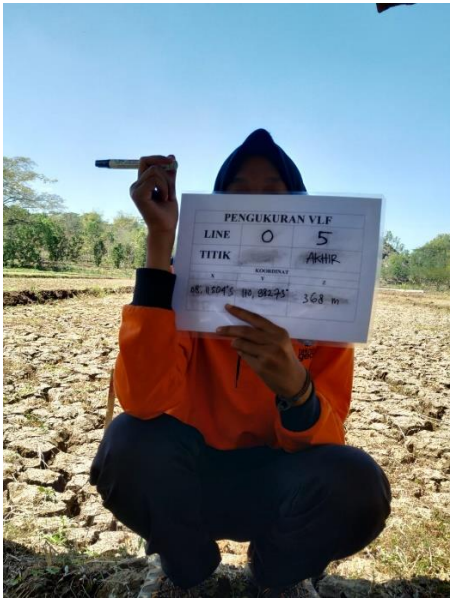
Gambar 2. Luweng Koboran 2



Gambar 3. Pengukuran Titik Pertama Lintasan 1

Gambar 4. Pengukuran Titik Terakhir Lintasan 1

Gambar 5. Pengukuran Titik Pertama Lintasan 2



Gambar 6. Pengukuran Titik Terakhir Lintasan 2

Gambar 7. Pengukuran Titik Pertama Lintasan 3

BIOGRAFI PENULIS

Penulis dilahirkan di Praya, sebuah kota di Kabupaten Lombok Tengah, NTB pada 28 Februari 1998. Penulis merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuh diantaranya yaitu SDN 4 Praya, SMPN 1 Praya dan SMAN 1 Praya. Tahun 2016 sebelum pengumuman kelulusan SMA, penulis mengikuti SNMPTN dan diterima dipilihan kedua yaitu Departemen Teknik Geofisika ITS. Saat menempuh perkuliahan di ITS, penulis aktif dalam kegiatan organisasi diantaranya HMTG ITS (Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika), HMGI Wilayah IV (Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia), KMTG AL-ARDH dan juga forum daerah seperti IMPLISIT dan HIMALAYA. Selain itu penulis juga aktif di kegiatan kepanitiaan *big event* jurusan (GEOSPHERE) dan pernah menjadi Asisten Laboratorium Fisika Dasar selama 2 periode 2018 dan 2019. Pada saat semester 6, penulis melakukan Kerja Praktik selama kurang lebih 1 bulan di Stasiun Geofisika Kelas III Mataram (BMKG).