

**IDENTIFIKASI GUA BAWAH TANAH BERDASARKAN
INTERPRETASI DATA *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR)**

SKRIPSI

Oleh:

MEITIA RATNA FALI

NIM. 16640002



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2020**

**IDENTIFIKASI GUA BAWAH TANAH BERDASARKAN
INTERPRETASI DATA *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR)**

SKRIPSI

Diajukan kepada:

**Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Oleh:

**MEITIA RATNA FALI
NIM. 16640002**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2020**

HALAMAN PERSETUJUAN

IDENTIFIKASI GUA BAWAH TANAH BERDASARKAN
INTERPRETASI DATA *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR)

SKRIPSI

Oleh:
Meitia Ratna Fali
NIM. 16640002

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji
Pada tanggal: 7 Desember 2020

Pembimbing I



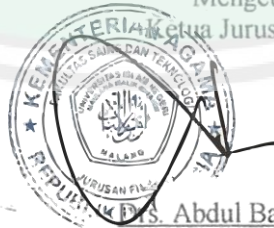
Irjan, M.Si
NIP. 19691231 200604 1 003

Pembimbing II



Ahmad Abtokhi, M.Pd
NIP. 19761003 200312 1 004

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika



Dr. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003




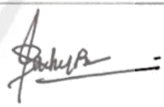
HALAMAN PENGESAHAN

IDENTIFIKASI GUA BAWAH TANAH BERDASARKAN
INTERPRETASI DATA *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR)

SKRIPSI


Oleh:
Meitia Ratna Fali
NIM. 16640002

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal: Desember 2020

Penguji Utama :	<u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP. 19650504 199003 1 003	
Ketua Penguji :	<u>Rusli, M.Si</u> NIDT. 19880715 20180201 1 245	
Sekretaris Penguji :	<u>Irjan, M.Si</u> NIP. 19691231 200604 1 003	
Anggota Penguji :	<u>Ahmad Abtokhi, M.Pd</u> NIP. 19761003 200312 1 004	



Mengesahkan,
Ketua Jurusan Fisika


Drs. Abdul Basid, M. Si
NIP. 19650504 199003 1 003

HALAMAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:


Nama : Meitia Ratna Fali
NIM : 16640002
Jurusan : Fisika
Fakultas : Sains Dan Teknologi
Judul penelitian : Identifikasi Gua Bawah Tanah Berdasarkan Interpretasi Data *Ground Penetrating Radar* (GPR)

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutip dan daftar pustaka.

Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk mempertanggung jawabkan, serta diproses sesuai peraturan yang berlaku.

Malang, 7 Desember 2020
Yang Membuat Pernyataan




Meitia Ratna Fali
NIM. 16640002

MOTTO

Jika kau tak suka sesuatu, ubahlah.

Jika tak bisa, maka ubahlah cara pandangmu tentangnya.



HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan mengucap rasa syukur Alhamdulillah

Skripsi ini ku persembahkan untuk:

1. Bapak Syaifudin dan Ibu Ridhotun Na'imah, untuk kasih sayang dan motivasi, serta doa yang tiada henti. Sehingga saya dapat menjalani dan melewati segala rintangan dalam kehidupan.
2. Adekku Devin Indra Kurniawan, untuk motivasi dan doanya untukku.
3. Para dosen dan pembimbing, yang telah membantu dalam membuka dunia melalui keluasan ilmu pengetahuan. Semoga dapat bermanfaat di Dunia dan di Akhirat.
4. Teman-teman seperjuanganku di program studi Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang angkatan 2016 yang selalu membantu hingga terselesaikannya skripsi ini.
5. Agamaku, Tanah Airku, dan Almamaterku !!!

Terimakasih atas motivasi yang telah diberikan selama ini, semoga Allah SWT membalas budi baik kalian semua, Amin.....

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Alhamdulillah puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Baginda Rasulullah Muhammad SAW. Atas ridho dan kehendak Allah SWT penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Identifikasi Gua Bawah Tanah Berdasarkan Interpretasi Data Ground Penetrating Radar (GPR)**” ini dengan baik. Skripsi ini ditulis dalam rangka menyelesaikan tugas akhir/skripsi yang merupakan salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Strata Satu (S1) Departemen Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa bantuan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Abdul Haris, M.Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Drs. Abdul Basid, M.Si selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Irjan, M.Si selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan bimbingan dan pengarahan dalam menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
5. Ahmad Abtokhi, M.Pd selaku dosen pembimbing integrasi yang telah membimbing, serta mengarahkan penulis dengan sabar dalam penulisan skripsi.
6. Seluruh Civitas Akademia Jurusan Fisika, dosen, laboran dan staf karyawan yang bersedia memberi ilmu dan pelayanan akademik dengan baik.
7. Bapak, Ibu, Adik dan keluarga yang senantiasa selalu mendoakan dan memberi kasih sayang serta dukungan moril maupun materil yang begitu besar kepada penulis.

8. Teman-teman yang selalu memberi motivasi, inspirasi dan semangat kepada penulis.

9. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan penulis demi kemajuan bersama. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat tidak hanya untuk penulis tapi juga manfaat dan menambah ilmu pengetahuan untuk para pembaca. Aamiin Ya Rabbal Alamin.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb.

Malang, 10 November 2020

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Masalah	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Tinjauan Geologi Daerah Penelitian	8
2.1.1 Fisiografi dan Geomorfologi	8
2.1.2 Statigrafi Data Geologi	11
2.2 Kawasan Karst dan Karakteristiknya	14
2.3 Gelombang Elektromagnetik	24
2.4 Gelombang Radar	29
2.4.1 Sistem Radar	30
2.5 Metode GPR	33
2.5.1 Prinsip Kerja GPR	36
2.5.2 Tipe Konfigurasi Akuisisi Data GPR	41
BAB III METODE PENELITIAN	44
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	44
3.2 Data Penelitian	45
3.3 Peralatan Penelitian	45
3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian	50
3.4.1 Proses Akuisisi Data GPR	50
3.4.2 Pengolahan Data GPR	51
3.4.3 Interpretasi Data GPR	54
3.5 Diagram Alir Penelitian	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	58
4.1 Hasil Survei	58
4.1.1 Hasil Akuisisi Data	58
4.1.2 Pengolahan Data	60
4.1.3 Interpretasi Gua Bawah Tanah dan Litologi Bawah Permukaan	61
4.2 Integrasi Penelitian Dengan Al-Qur'an dan Hadist	65
BAB V PENUTUP	70

5.1 Kesimpulan	70
5.2 Saran	70

DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Peta Geologi Daerah Penelitian.....	11
Gambar 2.2	Perkembangan Dolin di Daerah Iklim Sedang dan di Daerah Tropis.....	16
Gambar 2.3	Pembagian Zona Gua.....	22
Gambar 2.4	Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	25
Gambar 2.5	Sistem Kerja GPR.....	31
Gambar 2.6	Pola Radargram Indikasi Struktur Menyerupai Antiklin Bawah Permukaan di Bekas Jalan Tol Lumpur Sidoarjo	34
Gambar 2.7	Mekanisme Kerja Alat GPR.....	36
Gambar 2.8	Ketebalan Beberapa Medium dalam Tanah	38
Gambar 3.1	Lokasi Penelitian dan Lintasan.....	44
Gambar 3.2	<i>Transmitter</i>	45
Gambar 3.3	<i>Receiver</i>	46
Gambar 3.4	Odometer	46
Gambar 3.5	<i>Power Supply</i> Ser. No 651	47
Gambar 3.6	<i>Power Supply</i> Ser. No 799 dan Ser. No 800	47
Gambar 3.7	<i>Controller</i>	47
Gambar 3.8	Komputer/Laptop.....	48
Gambar 3.9	Kabel-kabel	48
Gambar 3.10	GPS dan Meteran	49
Gambar 3.11	Seperangkat GPR OKO AB-90	49
Gambar 3.12	Proses Akuisisi Data	51
Gambar 3.13	Diagram Alir Penelitian	57
Gambar 4.1	Profil Radargram Pada Line A	58
Gambar 4.2	Profil Radargram Pada Line B	59
Gambar 4.3	Profil Radargram Pada Line C	59
Gambar 4.4	Profil Radargram Pada Line D	59
Gambar 4.5	Sinyal Hasil Pengolahan Data Menggunakan <i>Software Reflex2DQuick</i> Pada Line A.....	60
Gambar 4.6	Sinyal Hasil Pengolahan Data Menggunakan <i>Software Reflex2DQuick</i> Pada Line B	60
Gambar 4.7	Sinyal Hasil Pengolahan Data Menggunakan <i>Software Reflex2DQuick</i> Pada Line C	60
Gambar 4.8	Sinyal Hasil Pengolahan Data Menggunakan <i>Software Reflex2DQuick</i> Pada Line D.....	61
Gambar 4.9	Hasil Radargram Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan pada <i>Software Reflex2DQuick</i> Line A	61
Gambar 4.10	Hasil Radargram Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan pada <i>Software Reflex2DQuick</i> Line B.....	62
Gambar 4.11	Hasil Radargram Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan pada <i>Software Reflex2DQuick</i> Line C.....	63
Gambar 4.12	Hasil Radargram Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan pada <i>Software Reflex2DQuick</i> Line D	64
Gambar 4.13	Hasil Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan 3 Dimensi	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kecepatan dan Konstanta Dielektrik Berbagai Medium	28
Tabel 2.2 Penentuan Frekuensi Antena yang digunakan	42
Tabel 2.3 Rekomendasi Penggunaan Sampling Frekuensi	43



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Dokumentasi Penelitian
- Lampiran 2 Peta Geologi Lembar Turen
- Lampiran 3 Data Penelitian
- Lampiran 4 Perhitungan
- Lampiran 5 Gua Lokasi Penelitian



ABSTRAK

Fali, Meitia Ratna. 2020. **Identifikasi Gua Bawah Tanah Berdasarkan Interpretasi Data *Ground Penetrating Radar* (GPR)**. Skripsi : Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing : (I) Irjan, M.Si, (II) Ahmad Abtokhi, M.Pd

Kata Kunci : Metode GPR, Kecepatan Rambat Gelombang, Gua Bawah Permukaan

Penelitian geofisika mengenai metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) telah dilakukan untuk identifikasi gua bawah tanah di Sumbermanjing Pletes, Kabupaten Malang. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan informasi mengenai gua bawah tanah pada daerah penelitian menggunakan metode GPR tipe OKO AB-90. Pengambilan data dilakukan disekitar mulut gua yang telah teridentifikasi diantaranya gua Pletes, gua Gedang dan gua Seneri dengan luas area penelitian sekitar 1.618,00 m² dengan jumlah line sebanyak 4 line. Pengolahan data dilakukan menggunakan *software GeoScan32* dan *software Reflex2DQuick*. Hasil dari rekaman GPR terdapat sinyal berbentuk lurus yang dapat diartikan sinyal tersebut tidak memiliki refleksi dan amplitudo. Fenomena tidak ditemukannya refleksi dan amplitudo tersebut diinterpretasikan sebagai posisi gua. Berdasarkan hasil interpretasi tersebut posisi gua dapat ditemukan disemua line dengan diameter sumbu lateral gua berkisar 1,5-3,5 meter. Interpretasi jenis batuan berdasarkan nilai kecepatan perambatan gelombang radar didapatkan hasil yaitu berupa batuan gampingpasiran dan batuan gamping.

ABSTRACT

Fali, Meitia Ratna. 2020. **Underground Caves Identification Based on Data Interpretation of Ground Penetrating Radar (GPR)**. Thesis: Department of Physics, Faculty of Science and Technology, State Islamic University of Maulana Malik Ibrahim Malang. Thesis Advisor: (I) Irjan, M.Si, (II) Ahmad Abtokhi, M.Pd

Keywords : GPR Method, Wave Propagation Velocity, Subsurface Caves

Geophysical studies about Ground Penetrating Radar (GPR) method have been carried out to identify underground caves in Sumbermanjing Pletes, Malang Regency. This study was purposed to provide information about underground caves in the study area using the OKO AB-90 type of GPR method. Data collection was carried out around the mouth of the caves that have been identified including Pletes cave, Gedang cave, and Seneri cave with an area of study approximately 1,618.00 m² with four lines. Moreover, the data processing was performed using GeoScan32 and Reflex2DQuick software. The result of the GPR recording describes that there is a straight signal which means that the signal has no reflection and amplitude. The phenomenon of the reflection and the amplitude is not found can be interpreted as the position of the cave. Based on the interpretation above, the position of the cave can be found in all lines with the diameter of the lateral axis of the cave around 1.5-3.5 meters. Also, the interpretation of rock types based on the value of the radar wave propagation velocity shows that the results are sandy limestone and limestone.

المستخلص

فالي، ميتيا رتنا. 2020. تعرف الكهف تحت الأرض تبعاً إلى تأويل بيانات رادار استكشاف باطن الأرض (GPR). بحث جامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم افسلامية الحكومية مالانج. المشرف: (1) إرجان، الماجستير؛ (2) أحمد أبطحي، الماجستير

الكلمات المفتاحية: طريقة GPR، سرعة سبيل الموج، الكهف تحت الأرض

انعقد البحث الجيوفيزيائي عن طريقة رادار استكشاف باطن الأرض لتعرف الكهف تحت الأرض بسومبر مانجينج بليتس، دائرة مالانج. يهدف هذا البحث إلى تقديم المعلومات عن الكهف تحت الأرض في نطاق البحث باستخدام طريقة GPR نوع OKO AB-90. يتم أخذ البيانات حول باب الكهف المعروفة، منها كهف بليتس، كهف غدانج، وكهف سنيري بسعة نطاق البحث 1.618,00 متر مربع بأربع سطور. وتمت إدارة البيانات باستخدام برنامج *GeoScan32* و *Reflex2DQuick*. فنتائج GPR تدل على أن هنالك إشارة مستمدة بمعنى ليس له الانعكاس والذبذبة. وافترضت هذه الظاهرة كموقف الكهف. استناداً على نتيجة التأويل، توجد مواقف الكهف في جميع السطور بقطرية 1,5—3,5 متراً. ودل تأويل نوع الحجارة تبعاً إلى سرعة سبيل موج رادار على وجود الحجر الكلسي والحجر الكلسي العضوي.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia yang dilintasi oleh garis khatulistiwa dengan jumlah pulau mencapai 16.056 pulau. Indonesia juga dilalui oleh cincin api (*ring of fire*) hal ini yang menyebabkan Indonesia memiliki banyak gunung aktif. Secara geografis Indonesia terletak di antara dua benua yaitu benua Asia dan Australia serta di antara dua samudra yaitu Hindia dan Pasifik. Hal ini menjadikan posisi Indonesia berada di wilayah strategis. Indonesia juga memiliki potensi sumber daya yang beragam, di dalamnya terdapat berbagai jenis batuan, bahan galian, dan sumber energi padat, cair dan gas, serta berbagai bentuk struktur tanah yang bermacam-macam seperti pegunungan, perbukitan, lembah, dan karst atau gua bawah tanah (Pratomo, 2006).

Kawasan karst di Indonesia memiliki luas sekitar 15,4 juta hektar dan tersebar hampir di seluruh Indonesia. Perkiraan umur karst dimulai sejak 470 juta tahun lalu sampai yang terbaru sekitar 700.000 tahun. Keberadaan kawasan ini menunjukkan bahwa pulau-pulau di Indonesia banyak yang pernah menjadi dasar laut, namun kemudian terangkat dan mengalami pengerasan. Wilayah karst biasanya berbukit-bukit dengan banyak gua (Eko Haryono, 2004).

Karst merupakan medan dengan batuan gamping yang dicirikan oleh drainase permukaan yang langka, tanah yang tipis dan hanya setempat-setempat, terdapatnya cekungan-cekungan tertutup (dolin), dan terdapatnya sistem drainase bawah tanah (Sutikno dan Eko Haryono, 2000). Daerah kawasan karst merupakan

daerah dengan bentang alam unik yang terjadi akibat adanya proses pelarutan pada batuan yang mudah terlarut (umumnya formasi batugamping). Proses tersebut menghasilkan berbagai bentuk formasi yang unik dan menarik. Bentang alam karst dengan berbagai kandungannya tersebar luas di Indonesia, dan mempunyai ciri-ciri bentuk muka bumi yang khas.

Daerah kawasan karst di Pulau Jawa tersebar pada zona pegunungan selatan, membentang dari sebelah barat hingga sebelah timur pulau, tersebar di Jawa Barat, Jawa Tengah, Daerah Istimewa Yogyakarta maupun Jawa Timur. Karstifikasi dan gua berkembang sangat baik, terutama di sepanjang pantai selatan. Di Jawa Timur daerah karst berkembang baik di Kabupaten Trenggalek, Kediri, Malang, Blitar, Tulungagung, dan Banyuwangi (Sujanto, dkk., 1992).

Perbukitan Malang Selatan merupakan kawasan yang didominasi karst dan tektonik dengan batuan induk berupa batugamping. Karst mempunyai bentang alam khas yang berkembang disuatu kawasan batuan karbonat (batugamping dan dolomit) atau batuan lain yang mudah larut dan mengalami karstifikasi atau pelarutan sampai tingkat tertentu, sedangkan wilayah tektonik merupakan kawasan yang memungkinkan pembentukan sesar dan joint retan terhadap potensi robohan batugamping sebagai batuan penyusun lahan. Kawasan perbukitan Malang Selatan merupakan kawasan yang mudah terdegradasi disebabkan oleh kondisi alamiah itu sendiri maupun pengaruh aktivitas manusia sehingga dikategorikan sebagai kawasan mudah rusak.

Gua adalah suatu lubang di tanah, atau di batuan, atau di gunung yang terbentuk secara alamiah. Gua umumnya terjadi akibat adanya suatu proses alam yang melubangi batuan. Bisa berbentuk suatu lorong yang panjang, gelap dan

berkelok-kelok, tetapi dapat pula sebagai suatu ceruk dalam. Secara umum terjadi pada dua batuan yang jauh berbeda, yaitu pada batugamping yang sangat intensif dan pada kasus-kasus khusus di aliran lava basalt, tetapi dapat pula terjadi pada semua jenis batuan yang mengalami tingkat abrasi/erosi yang kuat melewati struktur-struktur tertentu.

Allah SWT juga telah menjelaskan gua bawah tanah di dalam Al-Qur'an pada surat Al-Kahfi ayat 9-10 yang berbunyi:

أَمْ حَسِبْتُمْ أَنَّ أَصْحَابَ الْكَهْفِ وَالرَّقِيمِ كَانُوا مِنْ آيَاتِنَا عَجَبًا (٩) إِذْ أَوَى الْفِتْيَةُ إِلَى الْكَهْفِ فَقَالُوا رَبَّنَا آتِنَا مِنْ لَدُنْكَ رَحْمَةً وَهَيِّئْ لَنَا مِنْ أَمْرِنَا رَشَدًا (١٠)

Artinya:

“Kamu mengira bahwa orang-orang yang mendiami gua dan (yang mempunyai) raqiim itu, mereka termasuk tanda-tanda kekuasaan Kami yang mengherankan?” (9). “(Ingatlah) tatkala pemuda-pemuda itu mencari tempat berlindung ke dalam gua lalu mereka berdo'a: 'Wahai Rabb kami, berikanlah rahmat kepada kami dari sisi-Mu dan sempurnakanlah bagi kami petunjuk yang lurus dalam urusan kami (ini)' (10). (QS. Al-Kahfi: 9-10) (Al-Qur'an dan Terjemah, 2008).

Dalam ayat di atas Allah SWT menjelaskan tanda-tanda kekuasaan-Nya melalui gua, di dalam ayat tersebut dijelaskan bahwa pada masa Nabi Muhammad SAW gua dimanfaatkan sebagai tempat berlindung. Seiring berkembangnya zaman gua bawah tanah sudah beralih fungsi sehingga kita sebagai manusia mahluk Allah SWT yang paling mulia dengan dibekali akal untuk kita berfikir dan mempelajari apa yang telah diciptakan-Nya di atas langit dan di dalam bumi untuk kemudian bertanggung jawab untuk menjaganya.

Gua Pletes, gua Gedang, gua Seneri adalah gua yang terbentuk secara alamiah pada kawasan karst dengan batuan induk berupa batugamping. Gua-gua tersebut terletak di Desa Sumbermanjing Pletes, Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Kabupaten Malang. Gua Pletes terletak pada koordinat 08°15'35.1" LS dan

112°40'56.0'' BT, gua Gedang terletak pada koordinat 08°15'35.73'' LS dan 112°40'55.80'' BT, gua Seneri terletak pada koordinat 08°15'35.84'' LS dan 112°40'55.14'' BT.

Eksplorasi gua harus menggunakan alat dan keahlian yang memadai. Kedalaman gua, arah gua, serta struktur bawah permukaan/batuan penyusun gua hingga saat ini masih belum bisa diketahui. Survei geofisika adalah survei awal yang bertujuan untuk memetakan geologi bawah tanah berkenaan struktur geologi, stratigrafi, morfologi dan litologi batuan. Salah satu metode yang akan digunakan dalam penelitian kali ini yaitu metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) yakni untuk mengidentifikasi gua bawah tanah.

Metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mendeteksi benda-benda yang berada di bawah permukaan tanah. Metode ini cocok digunakan untuk mengidentifikasi gua. Metode ini menggunakan sumber gelombang elektromagnetik yang berupa gelombang radar untuk menentukan lokasi, kecepatan dan arah benda bergerak/diam dan bekerja dengan merefleksikan gelombang mikro. Alat ini terdiri dari *transmitter* sebagai pemancar sinyal elektromagnetik ke dalam bumi dan *receiver* sebagai perekam sinyal kemudian gelombang pantul ditangkap oleh penerima secara digital dipermukaan bumi. Prinsip operasi dari gelombang radar pada ruang kosong mirip dengan pantulan suara. Misalnya seseorang berteriak di lembah/gua, mereka akan mendengar suaranya sendiri yang dipantulkan kembali kepadanya, radar yang dipantulkan disebut gema. Prinsip kerja GPR (*Ground Penetrating Radar*) yaitu sinyal yang terefleksi diubah menjadi nilai numerik oleh penerima radar dan

dicatat sebagai data *echo store* selanjutnya data diolah dan dikonversikan menjadi gambar (Astutik, 1997).

Metode ini memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan metode lainnya, yaitu biaya operasional lebih murah, resolusi yang sangat tinggi karena menggunakan frekuensi tinggi (*broadband* atau *wideband*), pengoperasian yang cukup mudah, dan merupakan metode *non destructive* (tidak merusak) sehingga aman digunakan.

Identifikasi gua bawah tanah menggunakan metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) pernah dilakukan oleh (Shofiana, 2016) yang bertujuan untuk mengidentifikasi gua bawah tanah dan memetakan zona rawan amblesan atau zona *cavity* (rongga-rongga) yang diduga salah satu penyebab adanya potensi amblesan tanah berupa luweng/sinkhole profil 2D horizontal. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini akan difokuskan pada penyajian data GPR (*Ground Penetrating Radar*) dalam profil 2D vertikal sehingga diharapkan objek gua dapat teramati baik.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apakah identifikasi gua bawah tanah dapat dilakukan dengan metode GPR (*Ground Penetrating Radar*)?
2. Bagaimana litologi bawah permukaan gua bawah tanah berdasarkan interpretasi data GPR (*Ground Penetrating Radar*)?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah:

1. Untuk mengidentifikasi gua bawah tanah berdasarkan interpretasi data GPR (*Ground Penetrating Radar*).
2. Untuk mengetahui litologi bawah permukaan gua bawah tanah berdasarkan interpretasi data GPR (*Ground Penetrating Radar*).

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah:

1. Sebagai bahan informasi bagi pemangku kepentingan (*stakeholders*) agar dapat mengambil langkah-langkah nyata dalam melestarikan keberadaan gua bawah tanah untuk pengembangan wisata alam.
2. Dapat menambah wawasan pengetahuan khususnya dalam bidang fisika tentang penggunaan metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) yang menggambarkan litologi bawah permukaan di gua bawah tanah.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Terdiri 4 lintasan yang memiliki panjang bervariasi. Line A terletak pada koordinat A ($08^{\circ}15'35.54''$ LS dan $112^{\circ}40'56.12''$ BT) - A' ($08^{\circ}15'34.97''$ LS dan $112^{\circ}40'55.89''$ BT). Line B terletak pada koordinat B ($08^{\circ}15'35.70''$ LS dan $112^{\circ}40'55.80''$ BT) - B' ($08^{\circ}15'35.10''$ LS dan $112^{\circ}40'55.74''$ BT). Line C terletak pada koordinat C ($08^{\circ}15'35.84''$ LS dan $112^{\circ}40'55.54''$ BT) - C' ($08^{\circ}15'35.16''$ LS dan $112^{\circ}40'55.50''$ BT). Line D terletak pada koordinat D ($08^{\circ}15'35.82''$ LS dan $112^{\circ}40'55.14''$ BT) - D' ($08^{\circ}15'35.28''$ LS dan $112^{\circ}40'55.14''$ BT).
2. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu GPR (*Ground Penetrating Radar*) tipe OKO dengan Antena AB-90, metode yang digunakan adalah metode *Radar Reflection Profiling* dan pengolahan data menggunakan *software GeoScan32* dan *software Reflex2DQuick*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Geologi Daerah Penelitian

Pembagian satuan geomorfologi daerah penelitian ditentukan melalui berbagai tahap yaitu analisis pada peta topografi dengan melihat pola-pola kontur, kemudian melakukan sayatan morfometri (pengukuran beda tinggi dan sudut lereng) pada peta topografi serta melakukan pengamatan lapangan untuk hasil morfogenesisnya.

2.1.1 Fisiografi dan Geomorfologi

Morfogenesis adalah suatu urutan kejadian dan interaksi antara satuan bentang alam yang ada pada suatu daerah serta proses-proses geologi (proses endogenik dan proses eksogenik) yang mengontrolnya (Thonbury, 1969). Proses-proses endogenik (dari dalam) tersebut meliputi aktivitas vulkanisme dan tektonik serta proses eksogenik (dari luar) seperti pelapukan, erosi dan sedimentasi.

Proses geomorfologi adalah semua proses fisika, kimia dan biologi yang mengakibatkan perubahan pada bentuk bumi. Proses fisika ada yang berasal dari dalam bumi seperti penerobosan batuan beku, dan deformasi tektonik pada kerak bumi dan yang berasal dari luar bumi seperti penyinaran oleh matahari, hujan, salju dan juga jatuhnya meteorit ke permukaan bumi. Proses kimia seperti proses pembentukan topografi karst yang melibatkan berbagai proses kimiawi. Proses biologi seperti aktifitas hewan dan akar tumbuhan.

Media geomorfologi mempunyai kemampuan untuk memperoleh dan mengangkut material lepas di permukaan bumi. Jika media berasal dari luar bumi, tetapi masih dalam lingkungan atmosfer, disebut proses eksogen. Jika media berasal dari dalam bumi, disebut proses endogen. Media yang datang dari luar bumi seperti meteorit, disebut proses luar bumi (*extraterrestrial*).

Bentuk lahan dari proses geomorfologi dapat berupa bentuk lahan hasil yang bersifat membangun (*constructional landform*) atau bentuk lahan hasil yang bersifat merusak (*detructional landform*). Proses dan media dapat menghasilkan bentuk lahan berbeda disatu kawasan dengan kawasan lainnya, contoh: erosi oleh aliran sungai menghasilkan lembah (pengrusakan) dan juga dapat mewujudkan delta (membangun).

Pada lokasi penelitian kali ini yaitu di gua Pletes, gua Gedang, gua Seneri yang terletak di Desa Sumbermanjing Pletes, Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Kabupaten Malang. Lokasi penelitian tersebut masuk pada peta geologi Lembar Turen. Adapun satuan geomorfologi daerah penelitian yaitu:

1. Satuan Geomorfologi Tersayat Kuat - Pegunungan Karst (K3)

Satuan geomorfologi ini menempati $\pm 17,94\%$ dari keseluruhan daerah penelitian yaitu meliputi Desa Druju, Pletes, Sumbermanjing Wetan, dan Klepu. Secara morfometri satuan ini mempunyai kelereng rata-rata 57,17% dan beda tinggi rata-rata 64,41 meter. Satuan geomorfologi ini mempunyai kode K3 (Van Zuidam, 1983) yang berarti *karstic/denudational hills and mountain* atau perbukitan dan pegunungan karst denudasional mempunyai karakteristik topografi dengan lereng menengah sampai pegunungan dan permukaan berbatu.

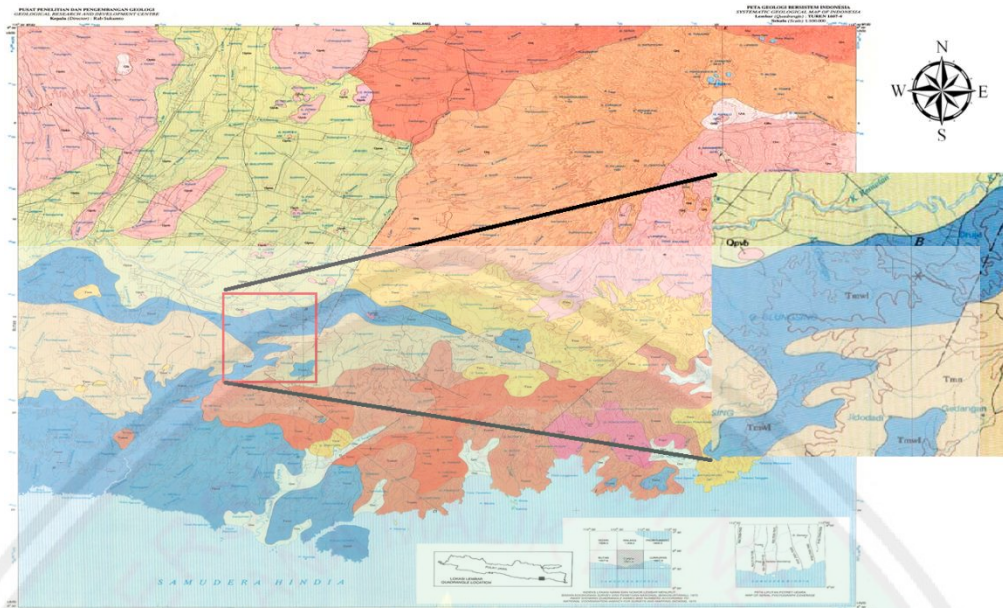
Bentukan asal ditandai adanya produk eksokarst berupa lapies dan produk endokarst berupa ornament gua stalaktit. Satuan geomorfologi ini dimanfaatkan penduduk sebagai ladang dan hutan. Pola pengaliran pada satuan ini adalah *dendritic*. Litologi penyusun berupa batugamping terumbu dan batugamping kristalin.

2. Satuan Geomorfologi Perbukitan - Tersayat Kuat Karst (K2)

Satuan geomorfologi ini menempati $\pm 5,65\%$ dari keseluruhan daerah penelitian yaitu meliputi Desa Druju, Pletes dan Sumbersuko. Secara morfometri satuan ini mempunyai kelerengan rata-rata 34,77% dan beda tinggi rata-rata 27,92 meter. Satuan geomorfologi ini mempunyai kode K2 (Van Zuidam, 1983) yang berarti *karstic/denudational slope and hills* atau lereng karst deudasional mempunyai karakteristik lereng karst pada batugamping yang relatif keras.

Bentukan asal ditandai adanya produk eksokarst berupa lapies dan produk endokarst berupa ornamen gua stalaktit dengan tipe *flowstone*. Satuan geomorfologi ini dimanfaatkan penduduk sebagai hutan. Pola pengaliran pada satuan ini adalah *dendritic*. Litologi penyusun berupa batugamping terumbu kristalin.

2.1.2 Statigrafi Data Geologi



Gambar 2.1 Peta Geologi Daerah Penelitian (Sujanto, dkk., 1992)

Keterangan :

Tmwl (warna biru): merupakan formasi wonosari yang meliputi batugamping, napal pasiran, sisipan batulempung.

Lokasi daerah penelitian berada pada Desa Sumbermanjing Pletes, Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Kabupaten Malang, Jawa Timur yang sebelumnya pernah dipetakan oleh Sujanto, dkk. (1992). Berdasarkan Peta Geologi Lembar Turen daerah penelitian mencakup lima formasi yang berurut dari tua ke muda, yaitu Formasi Mandalika, Formasi Wuni, Formasi Nampol, Formasi Wonosari, dan Endapan Tuf Gunung Api. Tatanan stratigrafi regional menurut Sujanto, dkk (1992) menunjukkan bahwa formasi tertua berumur Oligosen Akhir yaitu Formasi Mandalika, di atasnya diendapkan secara tidak selaras Formasi Wuni yang berumur Miosen Tengah, secara menjari selaras diendapkan Formasi Nampol yang berumur sama, di atasnya diendapkan Formasi Wonosari berumur Miosen Tengah sampai Miosen Akhir dan secara

tidak selaras di atasnya diendapkan formasi yang termuda yaitu Formasi Endapan Tuf Gunung Api berumur Kuartar.

Stratigrafi regional daerah penelitian berdasarkan peneliti terdahulu Sujanto, dkk (1992) pada Peta Geologi Regional Lembar Turen termasuk ke dalam Formasi Mandalika yang berumur Oligosen Akhir sampai Miosen Awal, Formasi Wuni yang berumur Miosen Tengah, Formasi Nampol yang berumur Miosen Tengah-Miosen Akhir, Formasi Wonosari yang berumur Miosen Akhir sampai Pliosen dan terakhir Endapan Aluvial yang berumur Kuartar. Tatanan stratigrafi daerah penelitian mengacu pada Martodjojo dan Djuhaeni (1996) berdasarkan litostratigrafi tidak resmi. Penamaan satuan batuan didasarkan pada litologi yang dominan pada setiap penyusun satuan dan diikuti dengan nama formasinya. Penentuan umur relatif menggunakan korelasi dari analisis fosil oleh peneliti dan dibandingkan dengan peneliti terdahulu Nahrowi (1978) dan Sujanto, dkk. (1992). Penelitian kali ini menggunakan 2 data sekunder dari penelitian terdahulu untuk menjadi acuan dalam melakukan penelitian. Dua data sekunder tersebut adalah Peta Geologi Lembar Turen (Sujanto, dkk., 1992) dan data penelitian terdahulu tentang Pegunungan Selatan Jawa Timur menurut Nahrowi, dkk (1978). Formasi yang terdapat pada daerah penelitian ini adalah:

A. Formasi Wonosari (Tmwl)

Formasi Wonosari terdiri dari batugamping, napal pasiran, dan sisipan batulempung kebiruan. Batugamping umumnya terdiri dari batugamping terumbu, batugamping kristalin dan batugamping pasiran, sebagian pejal sebagian berlapis. Pada beberapa batugamping dijumpai fosil foraminifera, koral, brachiopoda, gastropoda dan moluska. Batuan ini ke arah atas

berangsur-angsur berubah menjadi batugamping berlapis yang kaya akan foraminifera, dan batugamping terumbu yang pejal yang membentuk topografi karst. Fosil-fosil yang dikenali dalam formasi ini adalah *Lepidocyclina Sumatrensis*, *Miogypsina spp*, *Flosculina sp*, *Operculina sp*, *Marginopora sp*, *Globigerinoides spp*, *Globiquadrina sp*, *Amphitegina sp*, dan *Operculina sp*, yang menunjukkan kisaran umur dari Miosen Awal sampai Miosen Tengah.

Formasi Wonosari (Tmwl) terdiri dari:

1. Batu Gamping:

- a. Batu gamping koral, warna putih keruh kelabu, banyak mengandung fosil foram, ganggang, dengan permukaan kasar dan tajam, tebal lapisannya berkisar 3-50 meter.
- b. Batu gamping lempungan, warna kelabu-kehitaman, berfosil foram sebagai persilangan dengan lainnya dan tebalnya beberapa puluh centimeter.
- c. Batu gamping tufan, warna kelabu terang, setempat berbentuk fosil moluska, algae, sebagai persilangan dengan batu gamping pasir, tebal lapisan 0,5-20 centimeter.
- d. Batu gamping pasir, tekstur kasar sampai sedang, berwarna kelabu hingga coklat, mengandung kalsit, kuarsa dan mineral mafik, tebal lapisan 0,5-2 meter.

2. Bahan Batu Napal: Warna kelabu sampai putih kehijauan, berlapis tipis 3-10 cm, berfosil foram, moluska hingga sisa tumbuhan, sebagai sisipan batu gamping.
3. Bahan Batu Lempung: Warna hitam, setempat terdapat moluska air tawar, sisa tumbuhan dan bersisipan lapisan tipis gambut.
4. Bahan Batu Kalsirudit: Warna coklat merah, tebal lapisan antara 5 dan 20 cm, sebagai sisipan dalam batu gamping.

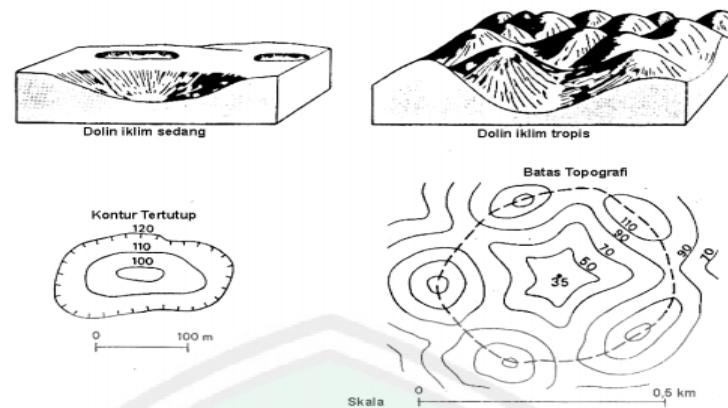
2.2 Kawasan Karst dan Karakteristiknya

Karst merupakan medan dengan batugamping yang dicirikan oleh drainase permukaan yang langka, solum tanah yang tipis dan hanya setempat-setempat, terdapatnya cekungan-cekungan tertutup (dolin), dan terdapatnya sistem drainase bawah tanah (Sutikno dan Eko Haryono, 2000). Tjahayo Nugroho Adji dkk (1999) mendefinisikan karst sebagai suatu kawasan yang unik dan dicirikan oleh topografi eksokarst seperti lembah karst, doline, uvala, polje, karren, kerucut karst, dan berkembangnya sistem drainase bawah permukaan yang jauh lebih dominan dari pada sistem aliran permukaannya. (Ford dan Williams, 1992) dalam (Nuraini, 2012) mendefinisikan karst sebagai medan dengan kondisi hidrologi yang khas sebagai akibat dari batuan yang mudah larut dan memiliki porositas sekunder yang berkembang baik.

Karst sebenarnya tidak hanya terjadi di batuan karbonat, tetapi terjadi juga di batuan lain yang mudah larut dan mempunyai porositas sekunder seperti batuan gipsum dan batugaram. Namun sebagian besar karst berkembang di batuan karbonat karena batuan karbonat memiliki sebaran yang paling luas (Eko

Haryono, 2004). Selanjutnya menurut Eko Haryono (2004) karst dicirikan oleh: Terdapatnya cekungan tertutup atau lembah kering dalam berbagai ukuran dan bentuk, Langkanya atau tidak terdapatnya drainase/sungai permukaan, dan Terdapatnya gua dari sistem drainase bawah tanah.

Proses pembentukan bentuk lahan karst atau dikenal dengan istilah karstifikasi, didominasi oleh proses pelarutan. Proses pelarutan batugamping diawali oleh larutnya CO_2 di dalam air membentuk H_2CO_3 . Larutan H_2CO_3 tidak stabil terurai menjadi H^+ dan $\text{H}_2\text{CO}_3^{-2}$. Ion H^+ inilah yang selanjutnya menguraikan CaCO_3 menjadi Ca^{+2} dan HCO_3^{-2} . Karstifikasi dipengaruhi oleh dua faktor yaitu faktor pengontrol dan faktor pendorong. Faktor pengontrol menentukan dapat tidaknya proses karstifikasi berlangsung, sedangkan faktor pendorong menentukan kecepatan dan kesempurnaan proses karstifikasi. Faktor pengontrol antara lain terdiri atas: batuan yang mudah larut, kompak, tebal, dan mempunyai banyak rekahan, curah hujan yang cukup (>250 mm/tahun), dan batuan terekspos di ketinggian yang memungkinkan perkembangan sirkulasi air/drainase secara vertikal. Faktor pendorong terdiri atas temperatur dan penutupan lahan. (Eko Haryono, 2004). Di daerah tropis perkembangan karst lebih intensif seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Perkembangan Doline di Daerah Iklim Sedang dan di Daerah Tropis (Ford and Williams, 1992)

Nilai kelangkaan kawasan karst terkait dengan waktu pembentukannya yang memakan waktu lama. Pembentukan kawasan karst utamanya oleh proses pelarutan dapat mengakibatkan degradasi. Kecepatan degradasi pada kawasan karst sangat lambat. Variasi tingkat degradasi tersebut tergantung pada suhu udara dan curah hujan tahunan (Eko Haryono dan Sutikno dalam Eko Haryono: 2004).

Sweeting 1972, dalam Eko Haryono (2004) mengklasifikasikan kawasan karst berdasarkan pada iklim yang terbagi menjadi:

- (1) *True* karst yang merupakan karst dengan perkembangan sempurna;
- (2) Fluviokarst yang dibentuk oleh kombinasi antara proses fluvial dan proses pelarutan;
- (3) Glasiokarst yang terbentuk karena karstifikasi didominasi oleh proses glasial;
- (4) *Nival* karst yang terbentuk karena karstifikasi oleh hujan salju; dan
- (5) *Tropical* karst atau karst yang terjadi di daerah tropis.

Karst yang ada di Indonesia termasuk ke dalam jenis yang terakhir ini (Eko Haryono, 2004).

Tipe karst lainnya adalah labyrinth karst merupakan karst yang dicirikan dengan koridor-koridor atau ngarai memanjang yang terkontrol oleh kekar dan sesar karst poligonal apabila semua batuan karbonat telah berubah menjadi kumpulan dolin dan dolin telah bergabung satu dengan lainnya; dan Karst Fosil merupakan karst yang terbentuk pada masa geologi lampau dan saat ini proses karstifikasinya sudah berhenti (Sweeting, 1972 dalam Eko Haryono, 2004). Beberapa hal penting dalam pembahasan mengenai geomorfologi karst antara lain Dolin, Polje, Bukit karst, Gua, Lembah karst, dan Hidrologi karst.

1. Dolin

Dolin berasal dari bahasa Slavia dolina yang berarti lembah. Dolin merupakan cekungan tertutup berbentuk bulat atau lonjong dengan ukuran beberapa meter hingga lebih kurang satu kilometer (Ford dan Williams, 1992 dalam Nuraini, 2012). Dolin menurut (Ford dan Williams (1992) dalam Nuraini, 2012) dibedakan menjadi enam yaitu solution doline, collapse doline, dropout doline, buried doline, caprockdoline, dan suffosion doline.

Tipe dolin juga dikelompokkan menjadi tiga tipe, yaitu:

- a. Dolin berbentuk mangkuk, rasio diameter dan kedalaman 1:10 dengan kemiringan lereng berkisar antara 100 sampai 200, dasar doline umumnya terisi oleh tanah.
- b. Dolin berbentuk corong, rasio antara diameter dan kedalamannya 2:1 sampai 3:1 dengan kemiringan lereng 30 sampai 40, dasar dolin tipe ini dengan batas bawah karstifikasi.

- c. Dolin berbentuk sumuran, dolin tipe sumuran memiliki diameter yang lebih kecil daripada kedalamannya dengan dinding dolin vertikal dan dasar dolin datar.

Setiap dolin atau cekungan tertutup tersusun oleh tiga komponen (White, 1988 dalam Eko Haryono, 2004) yaitu:

- (a) Pengatus, yaitu saluran ponor dengan permeabilitas tinggi yang mengataskan air dalam doline ke sistem drainase bawah tanah,
- (b) Mintakat yang berubah oleh proses pelarutan di permukaan dan dekat permukaan batuan,
- (c) Tanah penutup, koluvium, endapan glasial, abu vulkanik, atau material lepas yang lain. Namun di beberapa tempat material permukaan ini tidak ada.

2. Polje

Polje merupakan istilah yang berasal dari bahasa Slovenia yang berarti ladang yang dapat ditanami. Istilah ini di negara asalnya juga tidak berkaitan dengan bentuk lahan karst. Polje menurut Cvijic adalah bentuk lahan karst yang mempunyai elemen: cekungan yang lebar, dasar yang rata, drainase karstik, berbentuk memanjang yang sejajar dengan struktur lokal, dasar polje mempunyai lapisan batuan tersier (Eko Haryono, 2004).

Polje mempunyai karakteristik minimal sebagai berikut (Ford dan Williams, 1992 dalam Nuraini, 2012): Dasar yang rata dapat berupa batuan dasar maupun tertutup sedimen lepas atau aluvium, Cekungan tertutup yang dibatasi oleh perbukitan dengan lereng terjal pada dua sisi atau salah satu

sisinya, Mempunyai drainase karstik, Dasar yang rata mempunyai lebar minimum 400 meter.

Menurut (Ford dan Williams (1992) dalam Nuraini, 2012) polje dibedakan menjadi tiga yaitu:

- (a) Polje perbatasan *border* yang terbentuk apabila sistem hidrologi di dominasi oleh masukan air alogenik (dari luar sistem karst),
- (b) Polje struktural yang terbentuk karena pengaruh struktur (graben dan atau sesar miring) dengan batuan impermeabel di dalamnya,
- (c) Polje base *level* yang terbentuk regional muka air tanah memotong permukaan tanah.

3. Bukit Karst

Bukit karst umumnya mendominasi kenampakan pada kawasan karst, pada dasarnya merupakan bentuk lahan sisa atau residual dari proses perkembangan karst atau karstifikasi. Berdasarkan bentuknya bukit karst dibedakan menjadi kubah (*kegel karst*) dan karst menara (*trum karst*). Kerucut karst merupakan bentuk lahan yang ditandai oleh kumpulan bukit kecil berbentuk kerucut yang sambung-menyambung. Sela antara bukit kerucut membentuk cekungan dengan bentuk seperti bintang. Sedangkan menara karst atau *trum karst* merupakan tipe bentuk lahan karst yang dicirikan oleh bukit tinggi dengan lereng terjal biasanya ditemukan dalam kelompok yang dipisahkan satu sama lain oleh sungai atau lembah karst. Menara karst terbentuk dan berkembang apabila pelarutan lateral oleh muka air tanah yang sangat dangkal atau oleh sungai *allogenic* yang melewati singkapan batugamping (Eko Haryono, 2004).

4. Gua

Gua adalah suatu lubang di tanah, atau di batuan, atau di gunung yang terbentuk secara alamiah. Gua umumnya terjadi akibat adanya suatu proses alam yang melubangi batuan. Bisa berbentuk suatu lorong yang panjang, gelap dan berkelok-kelok, tetapi dapat pula sebagai suatu ceruk dalam. Secara umum terjadi pada dua batuan yang jauh berbeda, yaitu pada batugamping yang sangat intensif dan luas kejadiannya, dan pada kasus-kasus khusus di aliran lava basalt, tetapi dapat pula terjadi pada semua jenis batuan yang mengalami tingkat abrasi/erosi yang kuat melewati struktur-struktur tertentu. Gua juga merupakan suatu lorong bawah tanah yang didalamnya terdapat ekosistem yang unik.

Menurut (Nuraini, 2012), gua dapat diklasifikasikan berdasarkan proses terbentuknya menjadi tiga, yaitu:

- a. *Pit caves*, adalah gua yang terbentuk akibat proses perkembangan ponor yang semakin melebar dan berkembang ke arah vertikal. Pembentukannya dari perkembangan *shaft* secara terus menerus sampai terbentuk suatu sistem protocave.
- b. *Phreatic cave (flank margin cave dan banana hole)*, adalah gua yang berkembang pada daerah muka air tanah akibat pelarutan oleh air tanah, atau kemudian dinding gua runtuh sehingga memiliki mulut gua yang lebar. *Flank margin caves* terbentuk oleh proses pelarutan pada daerah tepi lensa muka air tanah yang berbatasan dengan muka air laut, proses pelarutan yang terjadi dipengaruhi oleh dua tenaga, yaitu tenaga air tanah dan tenaga air laut. *Banana hole* terbentuk

akibat adanya tenaga pelarutan yang bekerja secara horizontal akibat aliran air tanah.

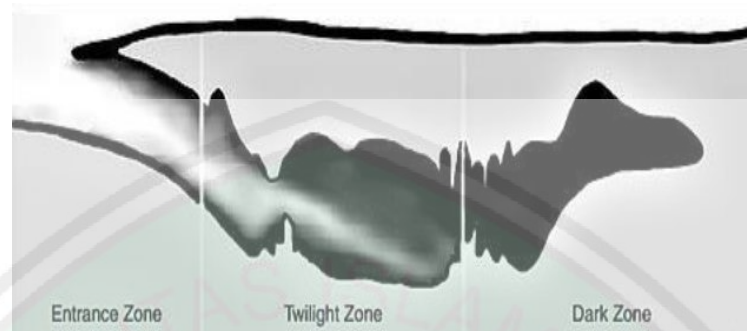
- c. *Fracture caves*, gua yang terbentuk akibat sesar atau patahan pada zona patahan dan berkembang baik secara vertikal maupun horizontal.

Lingkungan gua dapat dibagi menjadi tiga zona, yaitu: (Natuschka, 2012).

- a. *Entrance zone* merupakan zona yang berada dekat mulut gua sehingga tergolong zona yang terkena sinar matahari penuh, suhu dan kelembaban bervariasi, serta masih memungkinkan terdapat vegetasi.
- b. *Twilight zone* merupakan zona dengan sedikit cahaya, minimnya keberadaan kehidupan tanaman, serta terjadi perubahan suhu dan kelembaban minor.
- c. *Dark zone* adalah zona dimana tidak ada cahaya yang menembus serta suhu dan kelembaban konstan. Menurut Langer (2001) terdapat zona lain setelah *dark zone*, yaitu *stagnant zone* yang merupakan zona yang benar-benar kecil adanya oksigen.

Menurut Kusumayudha (2017), sistem gua dapat terbentuk di atas, pada, atau di bawah permukaan air tanah. Gua-gua ini terjadi apabila aliran air bebas secara perlahan mengikis dan memperlebar celah-celah retakan, bidang perlapisan, atau saluran-saluran yang ada. Aliran air biasanya bergerak di luar tipe aliran Darcian. Hal tersebut dapat terjadi di atas permukaan air tanah atau pada zona tak jenuh (zona vadus), gua yang terbentuk disebut gua vadus (*vadose cave*). Proses ini dapat pula terjadi di

bawah permukaan air tanah, yaitu apabila aliran terjadi pada celah-celah yang miring curam di bawah muka air tanah, gua yang terbentuk disebut gua freatik (*phreatic cave*).



Gambar 2.3 Pembagian Zona Gua (Langer, 2001)

5. Lembah Karst

Lembah karst merupakan topografi karst mayor yang dapat menunjukkan klasifikasi karakteristik dari lembah yang terdapat pada morfologi karst. Morfologi lembah karst dalam perkembangannya terbentuk oleh aliran air di permukaan karst tidak selalu dan tidak semuanya menghilang masuk ke dalam retakan batuan tetapi ada sebagian yang terus mengalir disertai proses pelarutan pada batuan yang dilaluinya hingga akhirnya terbentuk lembah karst. Menurut (Thonbury (1969) dalam Nuraini, 2012) lembah karst diklasifikasikan menjadi empat, yaitu:

- a. *Allogenic valley* terbentuk pada daerah karst yang berbatasan dengan batuan tidak larut. Lembah *allogenic* terbentuk dari dua proses yang bekerja yaitu proses solusional dan proses fluvial dalam hal ini berhubungan dengan aliran fluvial. Lembah ini terbentuk saat proses pelarutan dan aliran permukaan memasuki area karst yang mudah larut sehingga terbentuk lembah *allogenic*. Lembah *allogenic* memiliki morfologi lembah yang diapit oleh dinding terjal

menyerupai tembok besar yang terbentuk akibat kombinasi tenaga fluvial dan solusional.

- b. *Blind valley*, merupakan lembah yang berhubungan dengan ponor-ponor, dicirikan dengan aliran sungai dipermukaan hilang tertelan oleh ponor menjadi aliran sungai bawah tanah. Pembentukan *blind valley* dimulai dengan lembah fluvial yang tererosi hingga batuan impermeabel di atas batuan gamping saat melewati lubang air akan masuk dan sungai menjadi hilang secara permanen.
- c. Lembah kering atau *dry valley* merupakan lembah besar yang terbentuk akibat runtuhnya permukaan dikarenakan sungai bawah tanah yang sudah tidak dialiri air sehingga tidak mampu menahan beban material di atasnya.
- d. Lembah saku atau *poket valley* merupakan Lembah yang berhubungan dengan pemunculan air yang besar biasanya berbatasan dengan tebing bertingkat dan curam pada bagian atas. Kebalikan dari *blind valley*, berasosiasi dengan mata air besar yang berada pada batuan gamping masif. Memiliki bentuk dasar yang datar terkadang berbentuk U, lembah dengan tebing bertingkat, dan tebing yang curam pada bagian atas.

6. Hidrologi Karst

Pada sistem hidrologi karst terdapat tiga komponen utama yaitu akuifer, sistem hidrologi permukaan, dan sistem hidrologi bawah permukaan (Tjahyo Nugroho Adji, 2004). Di kawasan karst, cekungan bawah permukaan dapat diidentifikasi dengan mencari hubungan antara sungai

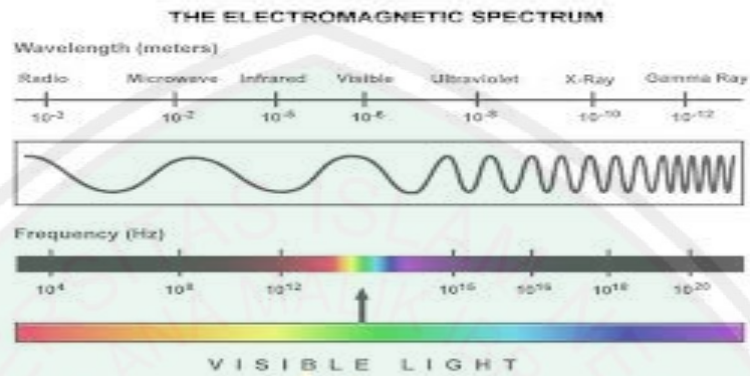
yang tertelan (*swallow holes*) dan mata air. Cekungan bawah permukaan ini dapat berkorelasi dengan cekungan aliran permukaan jika jalur lorong-lorong solusional pada bawah permukaan utamanya bersumber pada sungai permukaan yang masuk melalui ponor (Tjahyo Nugroho Adji, 2004).

Sistem hidrologi di daerah karst didominasi oleh pola *diffuse* (aliran permukaan atau limpasan yang bergerak pada rekahan-rekahan epikarst secara seragam kemudian muncul membentuk permunculan air) dan *conduit* (sistem aliran dari sungai permukaan yang kemudian tertelan dan masuk dalam lorong-lorong *conduit* karena adanya aktivitas sesar maka terpotong sehingga muncul ke permukaan). Hal ini merupakan dua hal ekstrim pada akuifer karst yang hampir tidak terdapat pada akuifer jenis lain (White, 1988 dalam Tjahyo Nugroho Adji, 2004). Ada kalanya suatu formasi karst didominasi oleh sistem *conduit* atau tidak terdapat lorong *conduit* tetapi lebih berkembang sistem *diffuse*. Pada umumnya daerah karst yang berkembang baik mempunyai kombinasi dua elemen tersebut. Tjahyo Nugroho Adji (2004) menyebutkan terdapat lagi satu sistem drainase di daerah karst yaitu sistem rekahan (*fissure*).

2.3 Gelombang Elektromagnetik

Gelombang merupakan hal yang paling mendasar dalam penelitian ini. Definisi gelombang adalah sebuah getaran yang merambat dalam ruang dan waktu. Gelombang elektromagnetik yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam spektrum gelombang mikro. Dalam suatu sistem radar, gelombang mikro dipancarkan terus menerus ke segala arah oleh pemancar. Jika ada objek yang

terkena gelombang ini, sinyal akan dipantulkan oleh objek dan diterima kembali oleh penerima. Sinyal pantulan ini akan memberikan informasi keberadaan objek yang ada di bawah permukaan tanah yang akan ditampilkan oleh layar radar (Muhyi, 2005 dalam Bahri, 2009).



Gambar 2.4 Spektrum Gelombang Elektromagnetik (Muhyi dalam Bahri, 2009)

Gelombang elektromagnetik mempunyai prinsip dasar dari persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell terdiri dari empat persamaan. Persamaan persamaan Maxwell menjelaskan bagaimana medan listrik dan medan magnet dapat terjadi. Persamaan-persamaan tersebut adalah (Griiffiths, 1999 dalam Muhyi, 2005):

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.2)$$

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

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.4)$$

Keterangan:

ϵ_0 = Permittivitas listrik ruang hampa ($8,85 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{Nm}^2$)

ρ = Tahanan jenis ($\Omega \cdot m$)

B = Medan magnet (tesla)

E = Medan listrik (N/C)

μ = Permeabilitas magnetik

J = Rapat arus (A/m^2)

Hukum Gauss menerangkan bagaimana muatan listrik dapat menciptakan dan mengubah medan listrik. Medan listrik cenderung untuk bergerak dari muatan positif ke muatan negatif. Hukum Gauss adalah penjelasan utama mengapa muatan yang berbeda jenis saling tarik menarik dan yang sama jenisnya saling tolak menolak. Muatan-muatan tersebut menciptakan medan listrik yang ditanggapi oleh muatan lain melalui gaya listrik. Hukum Gauss untuk magnetisme memiliki perbedaan dengan Hukum Gauss untuk listrik. Dalam hal ini tidak ada partikel “kutub utara” atau “kutub selatan”. Kutub-kutub utara dan kutub-kutub selatan selalu saling berpasangan. Hukum induksi Faraday mendeskripsikan bagaimana dengan mengubah medan magnet dapat tercipta medan listrik. Ini merupakan prinsip operasi dari generator listrik. Gaya mekanik seperti yang ditimbulkan oleh air pada bendungan memutar sebuah magnet besar, dan perubahan medan magnet ini menciptakan medan listrik yang mendorong arus listrik yang kemudian disalurkan melalui jala-jala listrik. Hukum Ampere menyatakan bahwa medan magnet dapat ditimbulkan melalui dua cara: yaitu

lewat arus listrik (perumusan awal hukum Ampere) dan dengan mengubah medan listrik (tambahan Maxwell) (Supriyanto, 2007).

Radiasi elektromagnetik yang direfleksikan material bergantung pada kontras konstanta dielektrik relatif per lapisan-perlapisan yang berdekatan. Jika kontras tersebut besar, maka jumlah energi gelombang radar yang direfleksikan juga besar. Koefisien refleksi (R) didefinisikan sebagai perbandingan energi yang dipantulkan dan energi yang datang. Besar R ditentukan oleh kontras kecepatan dielektrik relatif dari medium. Dalam semua kasus magnitudo R berada pada rentang ± 1 . Bagian energi yang ditransmisikan sama dengan $1-R$, sedangkan daya koefisien refleksi sama dengan R^2 (Astutik, 1997). Amplitudo koefisien refleksi diberikan oleh persamaan berikut:

$$R = \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (2.5)$$

dengan V_1 dan V_2 adalah kecepatan gelombang radar pada lapisan 1 dan 2 ($V_1 < V_2$) dan ϵ_1, ϵ_2 adalah konstanta dielektrik relatif (ϵ_r) dari lapisan 1 dan lapisan 2 (Astutik, 1997).

Kecepatan gelombang radar dalam beberapa medium tergantung pada kecepatan cahaya di udara ($c = 300\text{mm/ns}$), konstanta dielektrik relative (ϵ_r) dan permeabilitas magnetik relatif ($=1$ untuk material non magnetik). Selain itu kecepatan radar tergantung pada jenis bahan dan merupakan fungsi dari permitivitas relatif bahan. Kecepatan gelombang radar dalam material (V_m) diberikan oleh persamaan berikut (Reynolds, 1997 dalam Astutik, 1997):

$$V_m = \frac{c}{[(\epsilon_r \mu_r / 2)(1 + p^2) - 1]^{1/2}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

$c = 300\text{mm/ns} = \text{Kecepatan cahaya di udara}$

$\epsilon_r = \text{Konstanta dielektrik relatif}$

$\mu_r = \text{Permeabilitas magnetik relatif}$

$P = \sigma/\omega\epsilon \text{ (loss factor)}$

Untuk material dengan *loss factor* rendah ($P \approx 0$), maka berlaku persamaan berikut:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0,3}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m/ns} \quad (2.7)$$

Waktu yang dibutuhkan oleh gelombang elektromagnetik dari *transmitter* menuju ke suatu material dan kembali ke *receiver* disebut waktu tempuh dua arah (*two-way travel time*). Jika kedalaman material dan waktu tempuh sinyal dua arah diketahui, maka kecepatan perambatan gelombang elektromagnetik pada material dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$v = \frac{2d}{t} \quad (2.8)$$

Di bawah ini merupakan rentang harga kecepatan gelombang radar beberapa material yaitu:

Tabel 2.1 Kecepatan dan Konstanta Dielektrik Berbagai Medium (Reynolds, 1997)

Medium	ϵ_r	Kecepatan [m/ns]
<i>Udara</i>	1	0,30
<i>Air tawar</i>	81	0,33
<i>Batugamping</i>	7-16	0,11-0,12
<i>Granit</i>	5-7	0,13
<i>Garam kering</i>	5-6	0,13
<i>Basalt</i>	9	0,11

<i>Lempung</i>	4-16	0,15-0,16
<i>Lumpur</i>	9-23	0,055
<i>Pasir kering</i>	4-30	0,12-0,15
<i>Bauksit</i>	9	0,06
<i>Es</i>	3-4	0,16

Keuntungan menggunakan gelombang elektromagnetik di dalam metode ini adalah bahwa sinyal-sinyalnya memiliki panjang gelombang yang relatif pendek sehingga dapat dibangkitkan dan diradiasikan ke dalam permukaan tanah untuk mendeteksi beberapa anomali pada sifat dielektrik material geologi yang ada di bawah permukaan bumi. Sifat elektromagnetik yang biasa diukur menggunakan data GPR adalah konstanta dielektrik relatif. Konstanta ini biasanya digunakan untuk mengukur frekuensi dan survei lapangan yang dipengaruhi oleh air tanah. *Travel time* (kecepatan elektromagnetik) dan amplitudo dari sinyal GPR dapat juga digunakan untuk memperkirakan konstanta relatif dielektrik. Pengukuran *travel time* ini merupakan pengukuran paling efektif di dalam metode GPR untuk memperkirakan konstanta dielektrik relatif ketika geometri bawah permukaan diketahui atau ketika data variabel *offset* diperoleh (Warnana, 2008).

2.4 Gelombang Radar

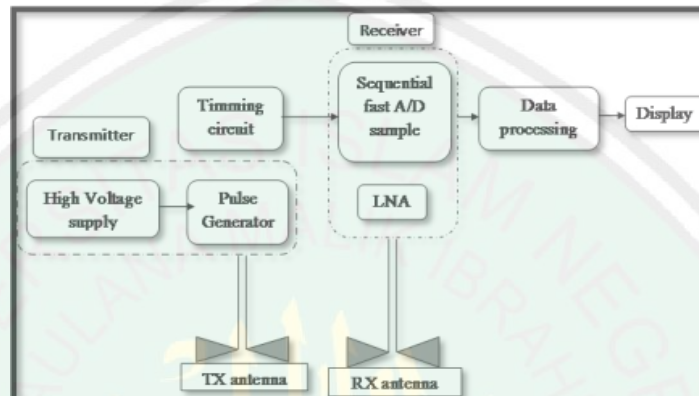
Ground Penetrating Radar menggunakan sumber gelombang elektromagnetik yang berupa radar (*Radio Detection and Ranging*). Pulsa yang dibangkitkan berupa pulsa bertenaga tinggi yang dipancarkan pada waktu yang sangat pendek. Gelombang elektromagnetik dipancarkan ke tanah oleh *transmitter* melalui antena sehingga pulsa radar mengenai dan menembus tanah lalu sinyal yang terpantul

dari tanah diterima oleh *receiver*. Berdasarkan waktu perjalanan pulsa radar maka dapat diperhitungkan jarak objek, dan berdasarkan intensitas tenaga baliknya maka dapat ditaksirkan jenis objek yang berada di dalam tanah. Intensitas atau kekuatan pulsa radar yang diterima kembali oleh sensor menentukan karakteristik spektral objek citra radar. Intensitas atau kekuatan tenaga pantulan pada citra radar dipengaruhi sifat objek dan sifat sistem radarnya. Sifat objek sebagai salah satu faktor penentu intensitas atau kekuatan tenaga pantulan pada citra radar. Sifat objek dipengaruhi oleh (Supriyanto, 2007): Lereng permukaan secara makro (topografi) menyebabkan perbedaan rona karena perbedaan arah menghadap ke sensor, Kekasaran permukaan yang menyebabkan perbedaan pantulan pulsa radar, Perbedaan kompleks.

2.4.1 Sistem Radar

Ground Penetrating Radar (GPR) biasa disebut georadar. Georadar berasal dari dua kata yaitu *geo* yang berarti bumi dan radar singkatan dari *radio detection and ranging*. Jadi, arti keseluruhannya adalah alat pelacak bumi menggunakan gelombang radio. *Ground Penetrating Radar* (GPR) merupakan teknik eksplorasi geofisika yang menggunakan gelombang elektromagnetik, bersifat non-destruktif dan mempunyai resolusi yang tinggi terhadap kontras dielektrik material dan formasi geologi yang relatif dangkal. Prinsip dasar metode ini tidak jauh berbeda dengan metode seismik refleksi yang telah berkembang luas penggunaannya di berbagai bidang seperti: konstruksi dan rekayasa, pencarian benda-benda arkeologi, untuk melihat kondisi geologi bawah permukaan dan masalah lingkungan. Sistem GPR terdiri atas pengirim

(*transmitter*), yaitu antenna yang terhubung ke sumber pulsa (generator pulsa) dengan adanya pengaturan *timing circuit*, dan bagian penerima (*receiver*), yaitu antenna yang terhubung ke LNA dan ADC yang kemudian terhubung ke unit pengolahan (data *processing*) serta *display* sebagai tampilan *output* nya (Bahri, 2009).



Gambar 2.5 Sistem Kerja GPR (Bahri S. Ayi, 2009)

Berdasarkan blok diagram tersebut masing-masing blok mempunyai fungsi yang cukup penting dan saling ketergantungan. Hal ini dikarenakan GPR merupakan suatu sistem mulai dari penghasilan pulsa pada *pulse* generator lalu melewati blok-blok yang ada kemudian sampai pada blok *display* dimana kita dapat melihat bentuk dan kedalaman objek yang dideteksi. Namun dalam hal ini antenna memegang peranan yang sangat penting karena menentukan unjuk kerja dari sistem GPR itu sendiri. Adapun faktor yang berpengaruh dalam menentukan tipe antenna yang digunakan, sinyal yang ditransmisikan, dan metode pengolahan sinyal yaitu (Daniel, 1996 dalam Bahri, 2009): Jenis objek yang akan dideteksi, Kedalaman objek, Karakteristik elektrik medium tanah atau properti elektrik.

Dari proses pendeteksian seperti di atas, maka akan didapatkan suatu radargram dari letak dan bentuk objek yang terletak di bawah tanah atau di permukaan tanah. Untuk menghasilkan pendeteksian yang baik, suatu sistem GPR harus memenuhi empat persyaratan sebagai berikut (Daniel, 1996 dalam Bahri, 2009): Kopling radiasi yang efisien ke dalam tanah, Penetrasi gelombang elektromagnetik yang efisien, Menghasilkan sinyal dengan amplitudo yang besar dari objek yang dideteksi, *Band width* yang cukup untuk menghasilkan resolusi yang baik.

Prinsip operasi dari radar beruang mirip dengan pantulan suara. Misalnya, seseorang berteriak di lembah atau gua, mendengar suaranya sendiri yang dipantulkan kembali kepadanya. Jika kita tahu bagaimana cepatnya perjalanan suara melalui udara, kita dapat menghitung jarak dan arah umum dari objek yang memantul. Dalam sistem radar, sinyal energi elektromagnetik digunakan dalam berbagai cara yang sama. Sinyal dengan frekuensi gelombang mikro yang dipancarkan ke obyek dan kemudian kembali setelah dipantulkan olehnya. Bagian sinyal yang mengembalikan ke radar inilah yang disebut “gema.” Perangkat radar menggunakan gema ini untuk menentukan arah dan jarak dari obyek untuk melakukan refleksi. Radar menggunakan energi yang dipantulkan, dikenal sebagai “gema,” daripada energi langsung dikirimkan sebagai sinyal. Sinyal yang terefleksi diubah menjadi nilai numerik oleh penerima radar dan dicatat sebagai data “*Echo Store.*” selanjutnya, data diolah dan dikonversi menjadi gambar.

Dalam keilmuan masa kini, radar (*Radio Detection and Ranging*) merupakan sistem gelombang elektromagnetik yang digunakan untuk

mendeteksi, mengukur jarak dan membuat map benda-benda seperti pesawat terbang, kendaraan bermotor dan informasi cuaca. Gelombang radio yang dipancarkan dari suatu benda dapat ditangkap oleh radar kemudian dianalisa untuk mengetahui lokasi dan bahkan jenis benda tersebut. Walaupun sinyal yang diterima relatif lemah, namun radar dapat dengan mudah mendeteksi dan memperkuat sinyal tersebut.

2.5 Metode GPR

Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) merupakan salah satu metode geofisika yang terpusat, tidak merusak, memiliki resolusi tinggi, dan cepat dalam mengambil data. GPR bekerja dengan menggunakan prinsip dasar radar yaitu mengirimkan impuls gelombang elektromagnetik (GEM) lalu menangkap pantulan gelombang yang berasal dari bahan atau per lapisan (Jol, 2009). Pantulan gelombang elektromagnetik yang ditangkap mempunyai frekuensi pada 50% di atas dan di bawah sebuah pusat frekuensi karakteristik GPR. Jika ada GPR dengan pusat frekuensinya 150 MHz maka daerah frekuensinya adalah 75 MHz sampai dengan 225 MHz. Material yang terletak di dalam lapisan batuan akan diketahui berdasarkan perbedaan konstanta dielektrik dan permeabilitas magnetik. GPR dapat digunakan untuk mengetahui keberadaan air tanah, studi arkeologi, studi sedimentasi, studi glasiologi, atau untuk keperluan teknik sipil.

Adapun data yang dicatat oleh GPR disebut sebagai radargram dan diwujudkan berupa grafika dari gradasi putih ke gelap yang menunjukkan intensitas gelombang pantul. Kemampuan penetrasi GPR bergantung pada frekuensi sinyal sumber, efisiensi radiasi antena dan sifat dielektrik material.

Sinyal radar dengan frekuensi yang tinggi akan menghasilkan resolusi yang tinggi, tetapi kedalaman penetrasinya lebih terbatas (Davis dan Anan, 1989).

Hasil dari pencatatan GPR berupa data radargram berwarna hitam dan putih yang merupakan intensitas gelombang pantul. Warna hitam menunjukkan fase gelombang ketika amplitudo negatif, sedangkan warna putih menunjukkan fase gelombang ketika amplitudo positif. Contoh pola radargram ditunjukkan oleh gambar 2.6 berikut:



Gambar 2.6 Pola Radargram Indikasi Struktur Menyerupai Antiklin Bawah Permukaan di Bekas Jalan Tol Lumpur Sidoarjo (Budiono, 2010)

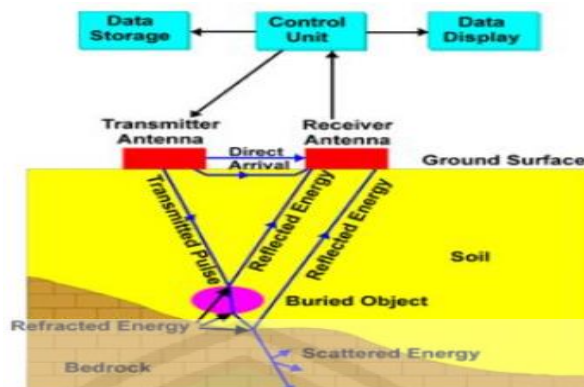
Sinyal-sinyal yang memiliki panjang gelombang relatif pendek dapat dibangkitkan dan diradiasikan ke dalam tanah untuk mendeteksi beberapa anomali yang terdapat pada sifat dielektrik material geologi. Ini merupakan salah satu keuntungan menggunakan gelombang elektromagnetik yang terdapat di bawah permukaan tanah (Chamberlain, 2000).

Prinsip yang digunakan dalam metode GPR yaitu dengan memancarkan (*transmisi*) dan menerima (*refleksi*) gelombang elektromagnetik (EM) dengan frekuensi yang cukup tinggi yaitu antara 1 MHz – 1000 MHz. Dari frekuensi yang telah diketahui, panas bumi merupakan salah satu sumber daya alam yang dapat dideteksi (Sulaiman dan Taufik, 2013).

Cara kerja dari *Ground Penetrating Radar* relatif sama dengan radar konvensional pada umumnya. Cara kerja dari metode GPR ini adalah sebagai berikut: Pulsa energi antara 10 sampai 1000 MHz dikirim ke dalam tanah oleh antena pemancar (*transmitter*) yang kemudian mengenai suatu lapisan atau objek dengan suatu konstanta dielektrik yang berbeda. Selanjutnya pulsa tersebut akan dipantulkan kembali dan akan diterima oleh antena penerima (*receiver*) sehingga waktu dan besar pulsa direkam dan data akan ditampilkan sebagai akuisisi penggambaran material bawah permukaan tanah (Yulius dkk, 2010).

Prinsip dasar dari skema kerja metode GPR ini yakni dengan jalan memancarkan gelombang radio berfrekuensi tinggi ke bawah permukaan melalui pemancar (*transmitter*). Hasil penjalaran gelombang ini akan dipantulkan kembali ke permukaan dan selanjutnya diterima oleh antena penerima (*receiver*), dan hasil dari penerima kemudian ditampilkan dalam sebuah diagram (radargram) yang langsung dapat tersajikan dalam bentuk visualisasi 2 Dimensi pada monitor penerima (*display*).

Sedangkan untuk prinsip kerja alat GPR yaitu dengan mentransmisikan gelombang radar (*Radio Detection and Ranging*) ke dalam medium target dan selanjutnya gelombang tersebut dipantulkan kembali ke permukaan dan diterima oleh alat penerima radar (*receiver*), dari hasil refleksi itulah berbagai macam objek dapat terdeteksi dan terekam dalam radargram. Mekanisme kerja GPR ditunjukkan oleh gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.7 Mekanisme Kerja Alat GPR (Sulaiman dan Taufik, 2013)

Metode GPR memiliki sifat tidak merusak dan mempunyai resolusi yang tinggi. Akan tetapi terbatas sampai kedalaman beberapa puluh meter saja. Meskipun demikian ternyata GPR dapat juga digunakan untuk banyak eksplorasi di dalam bidang geofisika seperti eksplorasi mineral, analisis sumber air tanah, studi arkeologi, studi keretakan jalan atau bendungan dan lain sebagainya. Selain untuk beberapa eksplorasi di atas metode ini juga dapat digunakan pada penerapan lingkungan seperti prediksi dan penentuan lokasi daerah bawah permukaan yang terkontaminasi zat pencemar (Sulaiman dan Taufik, 2013).

2.5.1 Prinsip Kerja GPR

Pada dasarnya GPR bekerja dengan memanfaatkan pemantulan sinyal. Semua sistem GPR pasti memiliki rangkaian pemancar (*transmitter*), yaitu sistem antena yang terhubung ke sumber pulsa, dan rangkaian penerima (*receiver*), yaitu sistem antena yang terhubung ke unit pengolahan sinyal. Rangkaian pemancar akan menghasilkan pulsa listrik dengan bentuk prf (*pulse repetition frequency*), energi, dan durasi tertentu. Pulsa ini akan dipancarkan oleh antena ke dalam tanah. Pulsa ini akan mengalami atenuasi dan cacat sinyal

lainnya selama perambatannya di tanah. Jika tanah bersifat homogen, maka sinyal yang dipantulkan akan sangat kecil. Jika pulsa menabrak suatu inhomogenitas di dalam tanah, maka akan ada sinyal yang dipantulkan ke antenna penerima. Sinyal ini kemudian diproses oleh rangkaian penerima. Kedalaman objek dapat diketahui dengan mengukur selang waktu antara pemancaran dan penerimaan pulsa. Dalam selang waktu ini, pulsa akan bolak balik dari antenna ke objek dan kembali lagi ke antenna. Jika selang waktu dinyatakan dalam t , dan kecepatan propagasi gelombang elektromagnetik dalam tanah v , maka kedalaman objek yang dinyatakan dalam h adalah (Bahri, 2009):

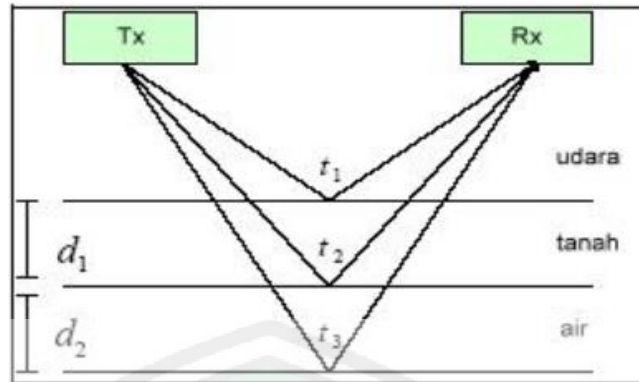
$$h = \frac{1}{2} tv \quad (2.9)$$

Untuk mengetahui kedalaman objek yang dideteksi, kecepatan perambatan dari gelombang elektromagnetik haruslah diketahui. Kecepatan perambatan (v) tersebut tergantung kepada kecepatan cahaya di udara (c), konstanta dielektrik relatif medium perambatan (ϵ_r) yaitu:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.10)$$

Ketebalan beberapa medium di dalam tanah dinyatakan dalam d , yaitu:

$$d_1 = \frac{(t_2 - t_1)C}{2\sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad \text{dan} \quad d_2 = \frac{(t_3 - t_2)C}{2\sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.11)$$



Gambar 2.8 Ketebalan Beberapa Medium dalam Tanah (Bahri, 2009)

Jika konstanta dielektrik medium semakin besar maka kecepatan gelombang elektromagnetik yang dirambatkan akan semakin kecil. *Pulse Repetition Frequency* (prf) merupakan nilai yang menyatakan seberapa seringnya pulsa radar diradiasikan ke dalam tanah. Penentuan prf dilandasi dengan kedalaman maksimum yang ingin dicapai. Semakin dalam objek, maka prf juga semakin kecil karena waktu tunggu semakin lama. Pada medium konduktor kedalaman penetrasi (*skin depth*) dalam metode GPR sangat dipengaruhi oleh frekuensi yang digunakan saat pengambilan data. Semakin tinggi frekuensi yang digunakan maka semakin dangkal kedalaman penetrasinya tetapi memiliki resolusi yang tinggi. Dan sebaliknya apabila frekuensi yang digunakan merupakan frekuensi rendah maka kedalaman penetrasinya akan semakin dalam tetapi memiliki resolusi yang rendah bila dibanding saat kita menggunakan frekuensi tinggi. Untuk menentukan *skin depth* dapat menggunakan rumus sebagai berikut (Astutik, 1997):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0}} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.12)$$

Keterangan:

δ = *Skin depth* (meter)

ρ = Resistivitas ($\Omega \cdot m$)

f = Frekuensi (Hz)

μ_r = Permeabilitas relatif (H/m)

μ_o = Permeabilitas magnet di udara/ruang vakum = $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

Kemampuan penetrasi GPR tergantung pada frekuensi sinyal, efisiensi radiasi antena dan sifat dielektrik material. Sinyal radar dengan frekuensi yang tinggi akan menghasilkan resolusi yang tinggi dengan kedalaman penetrasinya terbatas, sebaliknya sinyal radar dengan frekuensi rendah akan menghasilkan penetrasi kedalaman yang jauh tetapi resolusinya rendah.

Frekuensi gelombang radar yang dipancarkan dapat diatur dengan mengganti antena. Dimensi antena bervariasi dengan frekuensi gelombang radar, pemilihan frekuensi yang digunakan tergantung pada ukuran target, aproksimasi *range* kedalaman dan aproksimasi maksimum kedalaman penetrasi (Astutik, 1997).

Aplikasi GPR dapat dibagi dalam 2 klasifikasi berdasarkan pada frekuensi antena. Untuk aplikasi geologi, antena dengan frekuensi <500 MHz banyak digunakan karena penetrasi kedalaman lebih diutamakan dibandingkan dengan resolusinya. Untuk geoteknik, frekuensi yang digunakan lebih besar dari 500 MHz atau sekitar 1 GHz. Sebagai contoh penggunaan GPR untuk meneliti objek-objek yang terbuat dari logam atau bahan yang mengandung logam (metalik) menggunakan frekuensi antena sebesar 1000 MHz atau 1

GHz. Frekuensi ini tergolong tinggi sehingga memberikan resolusi yang tinggi pula, tetapi kedalaman penetrasinya terbatas. Untuk frekuensi observasi 1 GHz, objek metallic yang mampu diidentifikasi dengan baik berkedalaman hanya 20 cm hingga 40 cm dengan ketebalan dalam beberapa cm saja (Astutik, 1997).

Allah berfirman dalam Al-Qur'an surat Saba ayat 10 yang berbunyi:

وَلَقَدْ آتَيْنَا دَاوُدَ مِنَّا فَضْلًا يُّجِبَالُ أَوِّي مَعَهُ، وَالطَّيْرَ وَالنَّارَ لَهُ الْحَدِيدَ (١٠)

Artinya:

"Dan sesungguhnya telah Kami berikan kepada Daud karunia dari Kami. (Kami berfirman): "Hai gunung-gunung dan burung-burung! Bertasbihlah berulang-ulang bersama Daud", dan Kami telah melunakkan besi untuknya." (QS. Saba:10) (Al-Qur'an dan Terjemah, 2008).

Pada ayat di atas dijelaskan bahwa Nabi Daud telah diberi kitab dan ilmu dan juga telah dilunakkannya besi baginya sehingga besi itu seperti adonan yang bisa dia buat sebagaimana yang dia kehendaki agar dia membuat perlengkapan yang dibutuhkannya. Pada masa sekarang ini besi yang dilunakkan dapat dijadikan berbagai macam bentuk dan manfaat seperti pada penelitian ini dengan kitab dan ilmu yang kita miliki besi dapat dibentuk menjadi alat yang bernama GPR (*Ground Penetrating Radar*) yang dikenal sebagai "besi mangnetik lunak" karena sifat magnetik yang terutama digunakan dalam radar dan teknologi satelit. Besi lunak digunakan untuk memperkuat medan magnet dan dapat dibuka dan ditutup sesuai keinginan. Berkat ilmu yang kita miliki terciptalah alat-alat yang bermanfaat bagi manusia pada masa sekarang ini dengan bahan baku besi.

2.5.2 Tipe Konfigurasi Akuisisi Data GPR

Ada tiga cara penggunaan pengukuran sistem radar, yaitu: *radar reflection profiling*, *radar wide-angle reflection and refraction (WARR)*, dan *radar transillumination* atau *radar tomography*. Pemilihan cara tersebut tergantung kepada tujuan survei.

1. *Radar Reflection Profiling*

Cara ini dilakukan dengan membawa antena radar (*transmitter* dan *receiver*) bergerak bersamaan di atas permukaan tanah dimana nantinya hasil tampilan pada radargram merupakan kumpulan tiap titik pengamatan. Teknik pengukuran ini menghasilkan interpretasi struktur bawah permukaan bumi.

2. *Radar Wide Angle Reflection and Refraction (WARR)*

Cara *Wide Angle Reflection and Refraction (WARR) sounding* ini dilakukan dengan menaruh *transmitter* pada posisi yang tetap dan *receiver* dibawah pada area penyelidikan. *WARR sounding* diterapkan pada kasus dimana bidang reflektor relatif datar atau memiliki kemiringan yang rendah, karena asumsi ini tidak selalu benar pada kebanyakan kasus maka digunakan *CMP sounding* untuk mengatasinya.

3. *Radar Transillumination* atau Tomography

Metode ini dilakukan dengan meletakkan *transmitter* dan *receiver* pada posisi yang berlawanan. Sebagai contoh jika *transmitter* diletakkan pada satu sisi, maka *receiver* diletakkan pada sisi yang lain dan saling berhadapan. Umumnya metode ini digunakan pada kasus *non-destructive*

testing (NDT) dengan menggunakan frekuensi antena yang tinggi sekitar 900 MHz.

Pemilihan frekuensi antena ditentukan oleh tujuan survei yaitu tergantung pada kedalaman atau resolusi yang dibutuhkan dan kondisi material setempat. Semakin tinggi resolusi yang dibutuhkan maka frekuensi antena yang digunakan harus semakin tinggi. Tabel 2.2 Penentuan frekuensi antena yang digunakan.

Tabel 2.2 Penentuan Frekuensi Antena yang digunakan (Frank Lehmann dan Green, 1999)

Frekuensi antena (MHz)	Ukuran target (m)	Batas kedalaman (m)	Kedalaman penetrasi maksimum (m)
25	≥ 1	5-30	35-60
50	≥ 0.5	5-20	20-30
100	0.1 – 1.0	2-15	15-25
200	0.05-0.50	1-10	5-15
400	≈ 0.05	1-5	3-10
1000	Cm	0.05-2	0.5-4

Tabel 2.3 Rekomendasi Penggunaan Sampling Frekuensi (Frank Lehmann dan Green, 1999)

Frekuensi antena (MHz)	Rekomendasi sampling frekuensi (MHz)	Rekomendasi trace interval (m)
25	150-600	0.30-0.75
50	400-800	0.20-0.50
100	800-1800	0.10-0.30
200	1600-3500	0.03-0.10
400	3200-5000	0.02-0.10
1000	25000-110000	0.01-0.05

Dalam penelitian ini metode yang paling cocok digunakan yaitu Radar *Reflection Profiling*. Cara ini dilakukan dengan membawa antena radar bergerak bersamaan di atas permukaan tanah dimana nantinya hasil tampilan pada radargram merupakan kumpulan tiap titik pengamatan. Teknik pengukuran ini fokus pada hasil interpretasi litologi bawah permukaan bumi.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian identifikasi gua bawah tanah menggunakan GPR (*Ground Penetrating Radar*) OKO AB-90 ini dilaksanakan pada bulan Agustus 2020. Lokasi penelitian terletak di gua Pletes, gua Gedang, gua Seneri di Desa Sumbermanjing Pletes, Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Kabupaten Malang. Gua Pletes terletak pada koordinat $08^{\circ}15'35.1''$ LS dan $112^{\circ}40'56.0''$ BT, gua Gedang terletak pada koordinat $08^{\circ}15'35.73''$ LS dan $112^{\circ}40'55.80''$ BT, gua Seneri terletak pada koordinat $08^{\circ}15'35.84''$ LS dan $112^{\circ}40'55.14''$ BT. Topografi disekitar gua adalah lahan perkebunan masyarakat yang ditanami rumput gajah. Pengolahan data bertempat di Laboratorium Geofisika Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian dan Lintasan (Google Earth, Citra Google Maps, 2020)

Keterangan area penelitian: (1.618,00 m²) *Crossline*

3.2 Data Penelitian

Data yang diambil pada penelitian ini meliputi:

1. Koordinat lintang dan bujur.
2. Frekuensi gelombang radar.
3. Ketinggian titik ukur.
4. Panjang lintasan.
5. Tipe konfigurasi.
6. Kedalaman Gua
7. Panjang Gua
8. Jenis Material

3.3 Peralatan Penelitian

Pada penelitian ini, untuk mendapatkan radargram digunakan GPR OKO AB-90 dengan frekuensi maksimal 90 MHz. Alat ini terdiri dari unit-unit pokok yaitu:

1. Set Generator GPR AB-90 Ser. No 031 (*Transmitter*)



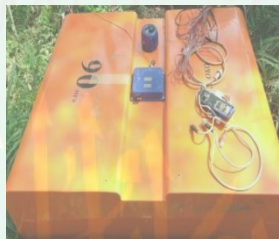
Gambar 3.2 *Transmitter*

Berfungsi sebagai penghasil gelombang radar, biasanya sudah dilengkapi dengan radargram dan antena *transmitter*, yang mampu memancarkan sinyal ke objek dengan syarat objek yang akan dikenali lebih besar dari panjang gelombang yang digunakan. Adapun generator ini letaknya di depan yang

berfungsi sebagai penghasil sinyal dan selanjutnya dipancarkan oleh antena *transmitter*.

Di bagian atas set generator GPR AB-90 terdapat tiga terminal. Pertama terminal untuk *converter* (dengan Ser. No 372) yang disambungkan ke laptop, kedua terminal DP untuk sambungan odometer, yang terakhir terminal IZP untuk sambungan ke set generator AB-90 Ser. No 032 (*receiver*)/bagian belakang.

2. Set Generator AB-90 Ser. No 032 (*Receiver*)



Gambar 3.3 *Receiver*

Letaknya berada di bagian belakang set GPR, dengan bentuk yang sama persis dengan *transmitter*, namun hanya memiliki sebuah terminal IZP untuk sambungan ke generator bagian depan serta baterai untuk suplai energi.

3. Odometer DP-32 Ser. No 312



Gambar 3.4 Odometer

Komponen ini dipasang pada bagian belakang set generator. Di bagian atasnya terdapat sebuah terminal DP. Odometer ini berfungsi sebagai pengukur panjang lintasan (meter) yang dilalui GPR.

4. *Power Supply* BP-9/12 Ser. No 651



Gambar 3.5 *Power Supply* Ser. No 651

Komponen ini mempunyai dua terminal dengan pilihan dua potensial saja, serta terdapat satu saklar dan dilengkapi dengan indikator berupa lampu. *Power supply* ini mampu menyuplai daya untuk GPR selama tiga jam.

5. *Power Supply* BP2/12 Ser. No 799 dan *Power Supply* BP2/12 Ser. No 800



Gambar 3.6 *Power Supply* Ser. No 799 dan Ser. No 800

Kedua *power supply* ini dipasang di atas set generator AB-90 Ser. No 031 dan AB-90 Ser. No 032. Pada setiap *power supply* terdapat satu saklar dan lampu indikator.

6. *Controller* (*Unit Control* Ser. No 262)



Gambar 3.7 *Controller*

Komponen ini berfungsi untuk mengontrol sinyal pada *receiver* sehingga bisa langsung ditampilkan pada monitor. *Controller* dipasang pada belakang laptop dan mempunyai empat buah terminal, yaitu terminal yang menghubungkan ke *power supply*, *converter*, laptop, dan *keyboard*. Pada *controller* terdapat saklar dan lampu indikator.

7. Komputer/Laptop



Gambar 3.8 Komputer/Laptop

Berfungsi untuk merekam dan menyimpan data pada saat di lapangan. Selain itu, komponen ini juga berfungsi sebagai alat monitoring visualisasi lapisan bawah permukaan secara langsung.

8. Kabel-kabel



Gambar 3.9 Kabel-kabel

Dalam penelitian ini, digunakan enam jenis kabel yaitu:

- Kabel *power supply* (12V) menghubungkan antara *Unit Control* Ser. No 262 dengan *power supply* BP-9/12 Ser. No 651.

- Kabel *Converter-Controller*, menghubungkan antara *converter* dengan *controller*.
- Kabel PC, menghubungkan *unit control* dengan laptop.
- Kabel *Converter-Transmitter* (kabel optik berwarna merah) menghubungkan *converter* dengan set generator GP AB-90 Ser. No 031.
- Kabel penghubung set generator GPR AB-90 Ser. No 031 (*transmitter*) dengan set generator GPR AB-90 Ser. No 032 (*receiver*).
- Kabel penghubung odometer dengan set generator GPR AB-90 Ser. No 031 (*transmitter*).

9. GPS dan Meteran



Gambar 3.10 GPS dan Meteran

10. Perangkat Lunak (*Software GeoScan32 dan Google Earth*)

Berikut merupakan gambar rangkaian seperangkat alat GPR (*Ground Penetrating Radar*) tipe OKO dengan Antena AB-90:



Gambar 3.11 Seperangkat GPR OKO AB-90

3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

3.4.1 Proses Akuisisi Data GPR

Tahap akuisisi data ini terdiri dari tahap pengambilan data yang dilakukan di daerah penelitian yakni di Desa Sumbermanjing Pletes, Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Kabupaten Malang. Dalam tahap pengambilan data ini akan dilakukan *scan* karakteristik batuan dengan metode *Ground Penetrating Radar* di beberapa gua bawah tanah dengan beberapa lintasan. Masing-masing lintasan memiliki panjang yang berbeda-beda diantaranya lintasan A 12 meter, lintasan B 22 meter, lintasan C 14 meter, lintasan D 24 meter. Selain itu lintasan penelitian ini memiliki spasi yang berbeda mulai dari 7 sampai 12 meter. Pada penelitian ini, pengambilan data di lapangan menggunakan sistem *Radar Reflection Profiling*. Sistem ini dilakukan dengan cara membawa antena radar (*transmitter* dan *receiver*) bergerak bersamaan di atas permukaan tanah, dimana nantinya tampilan pada radargram merupakan kumpulan tiap titik pengamatan yang terpisah pada jarak yang sama. Untuk mendapatkan data yang baik dan mewakili data dari lokasi penelitian, maka dalam pengumpulan data mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Mengecek kelengkapan alat (GPR) untuk penelitian.
- b. Mengukur panjang lintasan dengan meteran.
- c. Menentukan alur lahan yang akan *discan*.
- d. Merangkai alat.
- e. Menyalakan laptop dan membuka *software GeoScan32* kemudian operasikan dengan cara:
 - Menampilkan jendela “AB-90”

- Klik tombol “*record*” untuk merekam data. Alat GPR OKO akan melakukan *scan* otomatis.
- Menggeser georadar sepanjang lintasan pada daerah yang sudah ditentukan.
- Simpan data dengan memilih tombol “*save*”.



Gambar 3.12 Proses Akuisisi Data

3.4.2 Pengolahan Data GPR

Pengolahan data dilakukan dengan *software GeoScan32* dan *software Reflex2DQuick*. Keduanya adalah *software* yang dapat digunakan untuk mengolah data GPR atau seismik yang didapat di lapangan. Dari data yang didapatkan kali ini *software GeoScan32* hanya digunakan untuk melihat nilai kedalaman gua bawah tanah dan untuk menentukan material bawah permukaan pada daerah penelitian tersebut. Beberapa variabel yang didapatkan dalam pengolahan data menggunakan *software GeoScan32* yaitu: waktu ($t(\text{ns})$), kedalaman objek ($s(\text{m})$), dan panjang lintasan (m), dan konstanta dielektrik relatif tiap-tiap medium (ϵ_r).

Selain *software GeoScan32* juga digunakan *software Reflex2DQuick*. *Reflex2DQuick* memungkinkan akses cepat ke data GPR atau seismik (ultrasound) konstanta 2 dimensi (nol) *offset*. Pengimporan, tampilan, pemrosesan, interpretasi yang mudah dan beberapa data *offset nol* GPR yang diinstal secara otomatis. Pada

data kali ini *Reflex2DQuick* digunakan untuk menampilkan bawah permukaan agar terlihat jelas sehingga dapat menjelaskan keadaan bawah permukaan dan menentukan posisi gua.

Dalam pengolahan data yang didapat kali ini ada beberapa *step* dan sekuen *filtering* yang harus dilakukan agar dapat diperoleh radargram yang bagus antara lain:

1. *Subtract-mean (dewow)*

Step yang pertama yaitu *subtract-mean(dewow)*, dewow filter adalah langkah prosesing yang dilakukan untuk menghilangkan frekuensi sangat rendah yang terekam dalam radargram. Dewow termasuk ke dalam temporal *filtering*. Wow adalah *noise* frekuensi rendah yang terekam oleh sistem radar. Terjadi akibat instrumen elektronik yang tersaturasi oleh nilai amplitudo yang besar dari gelombang langsung (*direct wave*) dan gelombang udara yang biasanya bukan merupakan informasi yang berguna untuk pengolahan data. Untuk mengaktifkan *tool* ini kita perlu mengklik atau memberi tanda centang pada *option subtract-mean(dewow)*.

2. *Gain Function*

Step yang kedua yaitu *gain function*, filter ini digunakan karena pada lapisan tanah, frekuensi tinggi diserap lebih cepat dibandingkan dengan frekuensi rendah dan terjadi juga *spherical divergensi*, yaitu gelombang yang menjalar berkurang berbanding terbalik dengan kuadrat dari sumber dan hal ini sejalan dengan jarak dan waktu, maka untuk menghilangkannya dilakukan penguatan kembali amplitudo yang hilang sehingga seolah-olah disetiap titik energinya sama.

Proses *gain* dilakukan setelah proses *dewow filter* bertujuan agar *noise* *wow* yang merupakan *noise* berfrekuensi rendah tidak ikut terkuatkan sinyalnya, sehingga hanya sinyal asli yang terkuatkan. Untuk mengaktifkan *tool* ini kita perlu mengklik atau memberi tanda centang pada *option gain function* dan mengisi angka *gain* sesuai keperluan dari data kita.

3. *Background Removal*

Step yang ketiga yaitu *background removal*, *background removal* merupakan proses yang bertujuan untuk menghilangkan *noise* yang selalu muncul secara konsisten pada seluruh profil, sehingga menutupi sinyal yang sebenarnya. Efek yang dilakukan pada proses ini adalah menghilangkan energi koheren yang horizontal dengan frekuensi yang rendah. Untuk mengaktifkan *tool* ini kita perlu mengklik atau memberi tanda centang pada *option background removal*.

4. *Running Average*

Step yang keempat yaitu *running average*, *running average* dilakukan untuk mengurangi *random noise* dan *noise* berfrekuensi tinggi. Asumsi yang digunakan adalah bahwa sinyal mempunyai fase yang sama, sedangkan *noise* berfase acak, sehingga diharapkan dengan dilakukan *running average filter* maka dapat memperkuat amplitude sinyal dan melemahkan amplitude *noise*. Untuk mengaktifkan *tool* ini kita perlu mengklik atau memberi tanda centang pada *option running average*.

5. *Fk Migration (Stolt)*

Step yang kelima atau yang terakhir yaitu *fk migration (stolt)*, Proses ini digunakan untuk memindahkan data GPR ke posisi yang benar secara

horizontal maupun vertikal. Ketidakpastian posisi ini disebabkan oleh efek difraksi yang terjadi ketika gelombang elektromagnetik mengenai ujung atau puncak suatu diskontinuitas akibat perbedaan struktur geologi seperti sesar atau lipatan. Untuk mengaktifkan *tool* ini kita perlu mengklik atau memberi tanda centang pada *option fk migration (stolt)*.

Scanning kondisi bawah permukaan dengan GPR (*Ground Penetrating Radar*) menghasilkan citra dari georadar yang menggambarkan pantulan gelombang elektromagnetik. Citra ini dapat diinterpretasikan sebagai pantulan dari objek di dalam tanah, dalam hal ini, objek yang dicari adalah gua bawah tanah.

3.4.3 Interpretasi Data GPR

Secara teoritis, cara interpretasi data adalah sebagai berikut: data atau citra yang terekam ada variasi bentuk, yaitu bentuk datar atau biasa tanpa ada pola bentuk, tetapi apabila melewati suatu material, maka akan berubah bentuk atau tidak lagi datar, biasanya ada pola hiperbola. Pada data kali ini citra dari georadar yang menggambarkan pantulan gelombang elektromagnetik secara berlebihan atau hiperbola diinterpretasikan sebagai pantulan dari objek di dalam tanah berupa gua. GPR (*Ground Penetrating Radar*) dengan frekuensi tinggi memang dapat menghasilkan radargram dengan gambar hiperbola dan lengkungan yang lebih detail, namun penetrasi kedalaman yang terbatas. Radargram yang dihasilkan GPR (*Ground Penetrating Radar*) dengan frekuensi rendah memang tidak sedetail frekuensi tinggi, namun penetrasinya lebih dalam. Dari data yang didapat tersebut

kemudian diolah menggunakan *software GeoScan32* dan *software Reflex2DQuick*.

Setelah selesai pengolahan data, teknik analisis data dengan cara menentukan posisi gua atau ruang hampa dengan melihat hasil radargram yang ada dan mencocokkan nilai kecepatan perambatan gelombang radar dengan Tabel 2.1. Tiap-tiap tipe refleksi yang terekam pada radargram menggambarkan kondisi geologis pada daerah pengambilan data. Harga konstanta dielektrik dan kecepatan gelombang radar pada masing-masing medium berbeda-beda. Dilihat dari tidak adanya refleksi dan amplitudo pada hasil radargram yang ditandai dengan sinyal berbentuk lurus menandakan nilai permitivitas yang sangat kecil dan hal tersebut menunjukkan adanya indikasi keberadaan gua atau ruang hampa.

Berapa hal yang harus diperhatikan dalam interpretasi data antara lain:

1. Interpretasi Grafik

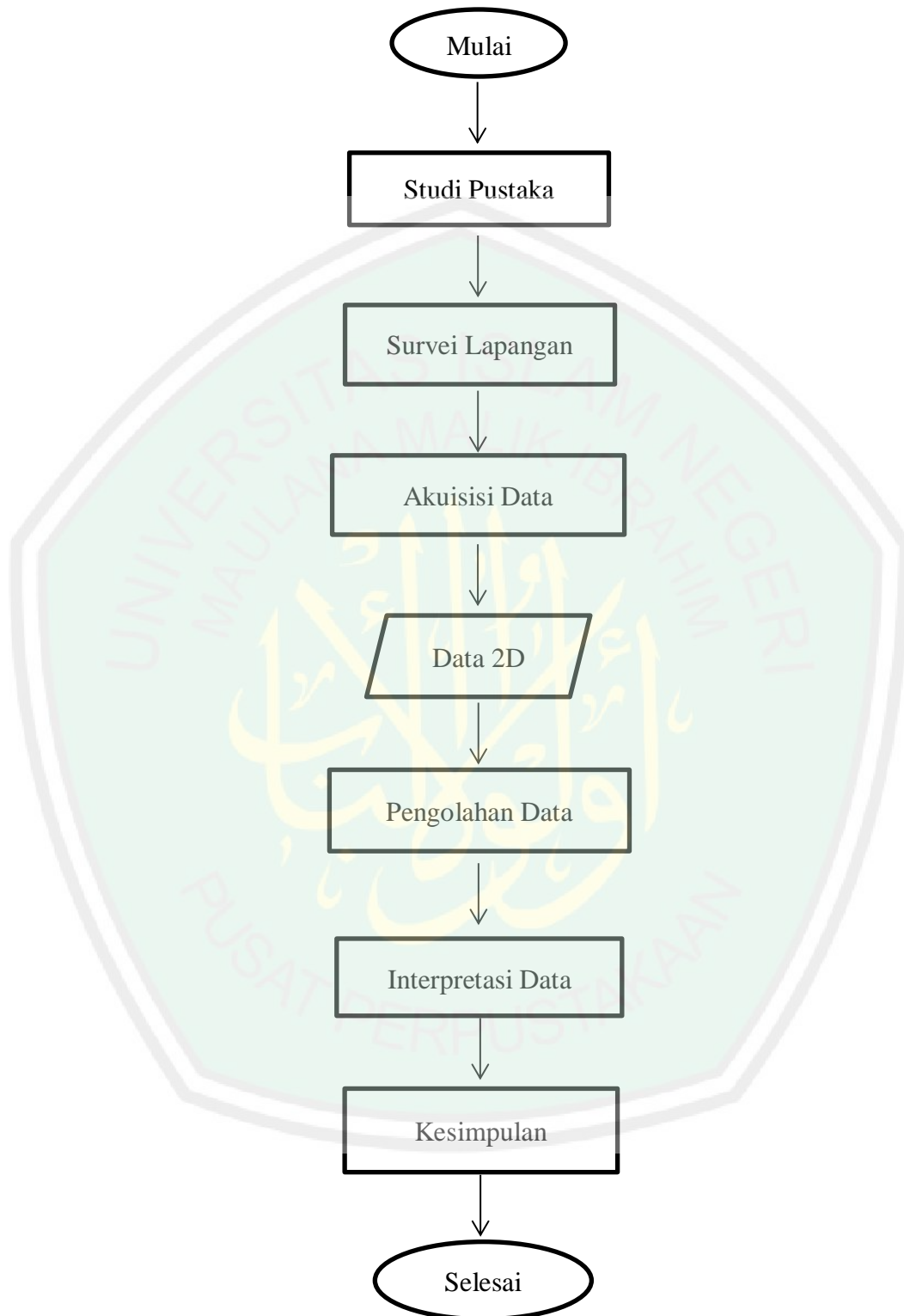
Kecepatan gelombang dapat diketahui dengan mengasumsikan bahwa nilai konstanta dielektrik mendekati nilai material yang diselidiki sehingga *two-way travel time (TWT)* dapat diterjemahkan menjadi nilai kedalaman. Apabila hasil tersebut ditambahkan parameter identifikasi terhadap sinyal pantulan (refleksi) yang berasal dari target maka *two-way travel time (TWT)* yang dihasilkan menunjukkan nilai kedalaman, ketebalan, perlapisan, dll. Untuk itu hasil tersebut dapat digunakan dalam penentuan nilai kecepatan gelombang yang sebenarnya. Jadi kedalaman dapat dipengaruhi oleh nilai cepat rambat material terhadap energi elektromagnetik serta waktu tempuh reflektor dalam TWT.

2. Analisa Kuantitatif

Analisa kuantitatif yang digunakan diantaranya adalah analisa terhadap amplitudo, koefisien refleksi, dan analisa kedalaman. Analisa terhadap kedalaman target atau reflektor dipengaruhi oleh nilai variasi konstanta dielektrik relatif material yang dilewati serta hasil analisis kecepatannya.



3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.13 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

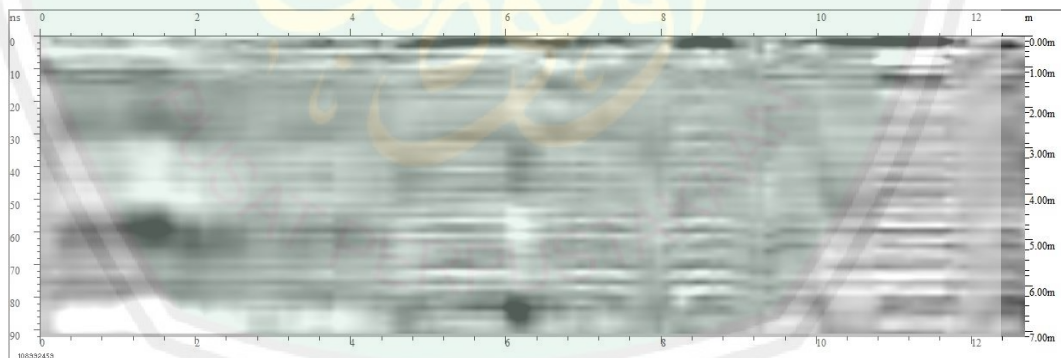
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Survei

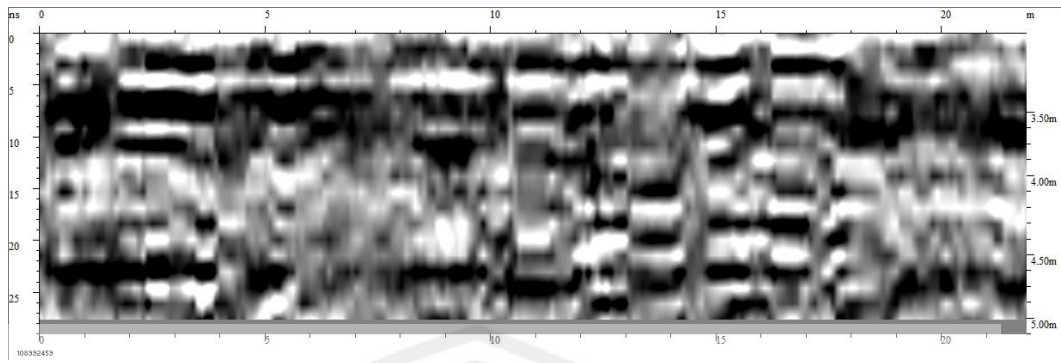
Data hasil survei merupakan citra radargram GPR (*Ground Penetrating Radar*) yang terbaca pada *software GeoScan32*. Metode pengambilan data menggunakan metode *Radar Reflection Profiling* berupa bentuk radargram grafika dari gradiasi putih ke gelap yang menunjukkan intensitas gelombang pantul. Data hasil *scanning* ini selanjutnya diolah kedalam bentuk sinyal menggunakan *software Reflex2DQuick*.

4.1.1 Hasil Akuisisi Data

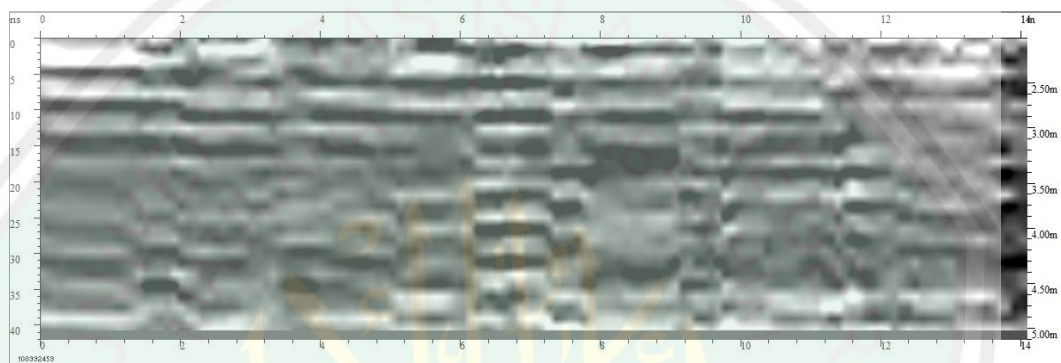
Terdiri dari empat line yaitu Line A, Line B, Line C, dan Line D. Profil hasil *scan* pada masing-masing line ditunjukkan pada gambar berikut:



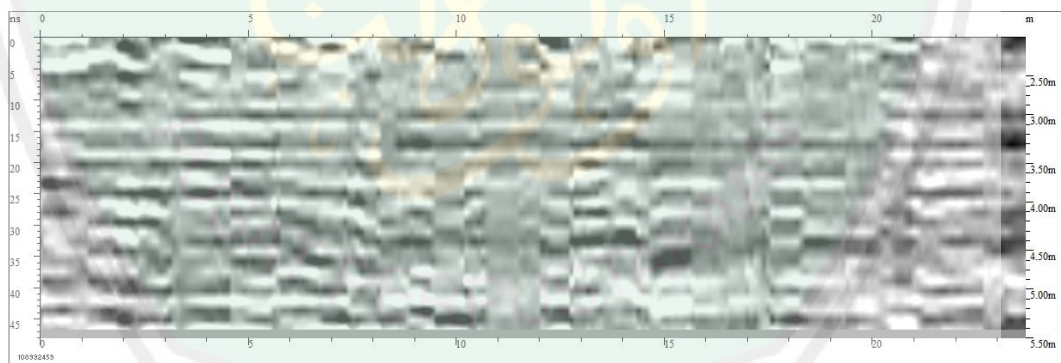
Gambar 4.1 Profil Radargram Pada Line A



Gambar 4.2 Profil Radargram Pada Line B



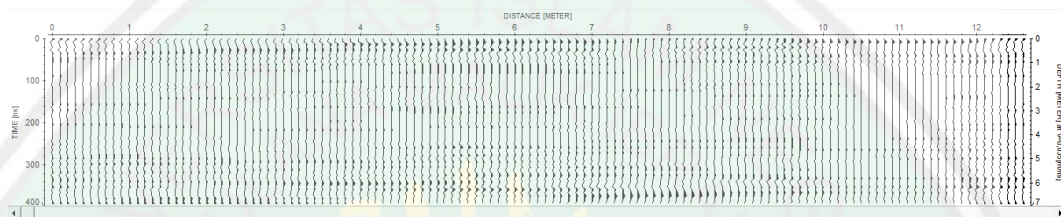
Gambar 4.3 Profil Radargram Pada Line C



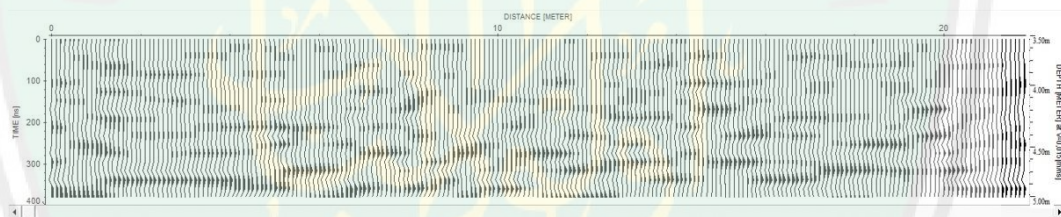
Gambar 4.4 Profil Radargram Pada Line D

4.1.2 Pengolahan Data

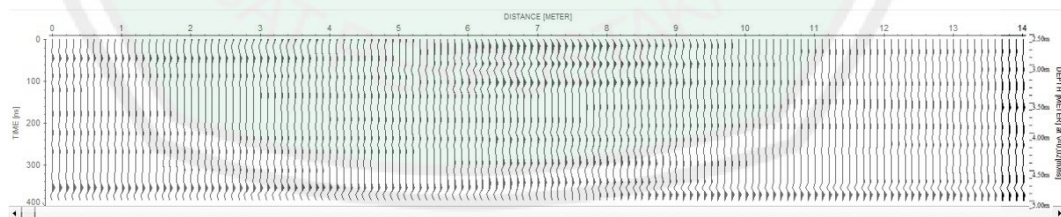
Hasil rekaman radargram selanjutnya dilakukan pengolahan data dengan menggunakan *software Reflex2DQuick* untuk menampilkan sinyal dan dilakukan beberapa proses *filtering* data standar yaitu: (*subtract-mean* (*dewow*), *gain function*, *background removal*, *running average*, *fk migration* (*stolt*)). Berikut hasil pengolahan data yang didapatkan:



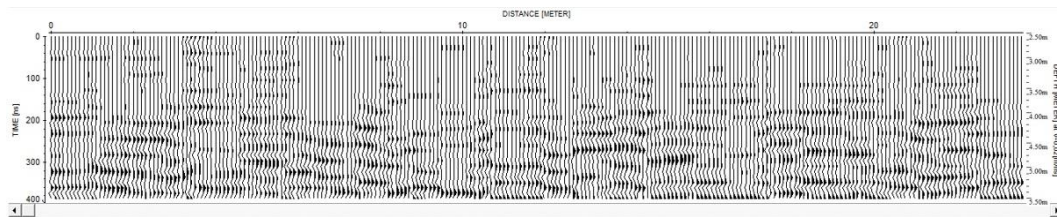
Gambar 4.5 Sinyal Hasil Pengolahan Data Menggunakan *Software Reflex2DQuick* Pada Line A



Gambar 4.6 Sinyal Hasil Pengolahan Data Menggunakan *Software Reflex2DQuick* Pada Line B



Gambar 4.7 Sinyal Hasil Pengolahan Data Menggunakan *Software Reflex2DQuick* Pada Line C



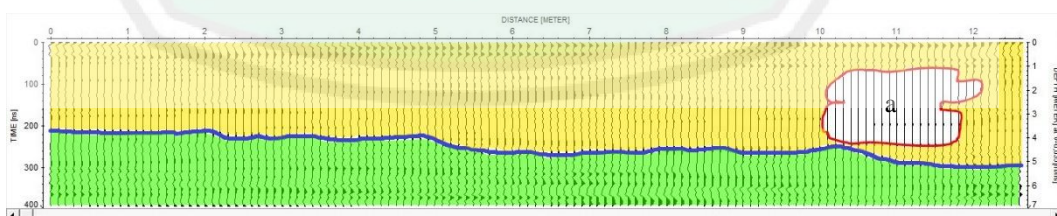
Gambar 4.8 Sinyal Hasil Pengolahan Data Menggunakan *Software Reflex2DQuick* Pada Line D

4.1.3 Interpretasi Gua Bawah Tanah dan Litologi Bawah Permukaan

Interpretasi data GPR (*Ground Penetrating Radar*) ini dilakukan untuk mengetahui keberadaan gua dan mengetahui litologi bawah permukaan. Dimana dalam proses penentuan indikasi gua dilihat dari sinyal yang berbentuk (lurus) atau tidak memiliki refleksi dan amplitudo. Sementara untuk menentukan batas litologi bawah permukaan didasarkan pada kontinuitas amplitudo maksimum. Untuk menentukan jenis batumannya diperkirakan dari nilai kecepatan perambatan gelombang radar pada masing-masing tubuh batuan kemudian dicocokkan dengan Tabel 2.1 dan data geologi lembar turen.

Interpretasi gua bawah tanah dan litologi batuan bawah tanah pada masing-masing line dapat ditunjukkan pada gambar berikut:

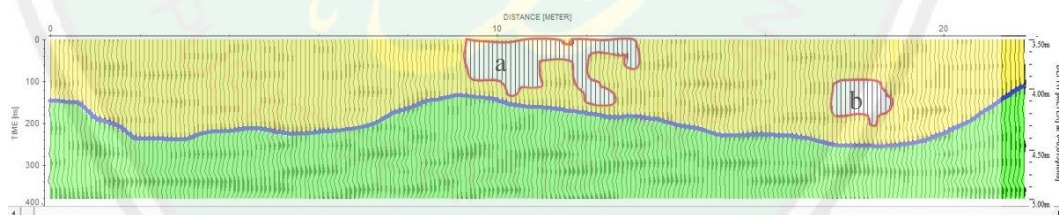
1. Pada Line A



Gambar 4.9 Hasil Radargram Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan pada *Software Reflex2DQuick* Line A. (a) gua Pletes

Pada daerah pengambilan data tersebut posisi line A berada tepat di atas permukaan gua Pletes, *scan* data dimulai dari posisi (selatan) ke (utara). Ditinjau dari gambar radargram di atas pada jarak ke 10 sampai 12 meter dari titik awal pengukuran terdapat sinyal dengan pola (lurus) yang mengindikasikan posisi sebuah gua bawah tanah dan diameter sumbu lateral gua yaitu sekitar 2 meter. Litologi batuan bawah permukaan pada line A terdiri atas batuan gampingpasiran (warna kuning) dengan nilai kecepatan ($v= 0,11-0,15$ m/ns), dan batuan gamping (warna hijau) dengan nilai kecepatan ($v= 0,11-0,12$ m/ns). Posisi gua pada line A berada pada batuan gampingpasiran, ketebalan batuan gampingpasiran pada semua line bervariasi secara lateral, posisi batuan gampingpasiran berada dibagian atas dan batuan gamping pada posisi bawahnya, ketebalan batuan gamping tidak diketahui karena yang terdeteksi hanya bagian atasnya saja.

2. Pada Line B

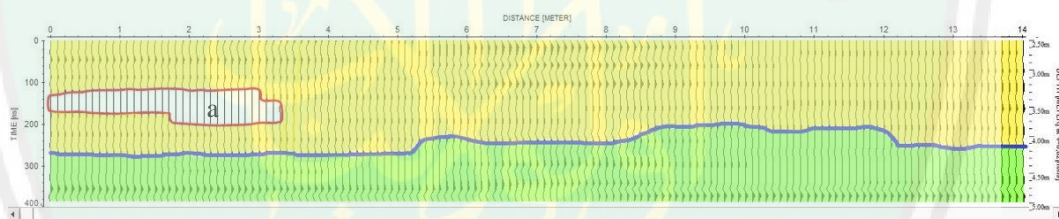


Gambar 4.10 Hasil Radargram Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan pada *Software Reflex2DQuick* Line B. (a) pendugaan rongga (b) gua Gedang

Pada daerah pengambilan data tersebut posisi line B berada tepat di atas permukaan gua Gedang, *scan* data dimulai dari posisi (utara) ke (selatan). Berdasarkan hasil pengukuran didapatkan hasil interpretasi posisi dua buah gua berada pada jarak 9,5 sampai 13 meter dan 17,5 sampai 19 meter dari titik awal

pengukuran ditunjukkan dengan adanya sinyal dengan pola (lurus) dan diameter sumbu lateral gua yaitu sekitar 3,5 meter dan 1,5 meter. Litologi batuan bawah permukaan pada line B terdiri atas batuan gampingpasiran (warna kuning) dengan nilai ini kecepatan ($v= 0,11-0,15$ m/ns), dan batuan gamping (warna hijau) dengan nilai kecepatan ($v= 0,11-0,12$ m/ns). Posisi gua pada line B berada pada batuan gampingpasiran, ketebalan batuan gampingpasiran pada semua line bervariasi secara lateral, posisi batuan gampingpasiran berada dibagian atas dan batuan gamping pada posisi bawahnya, ketebalan batuan gamping tidak diketahui karena yang terdeteksi hanya bagian atasnya saja.

3. Pada Line C

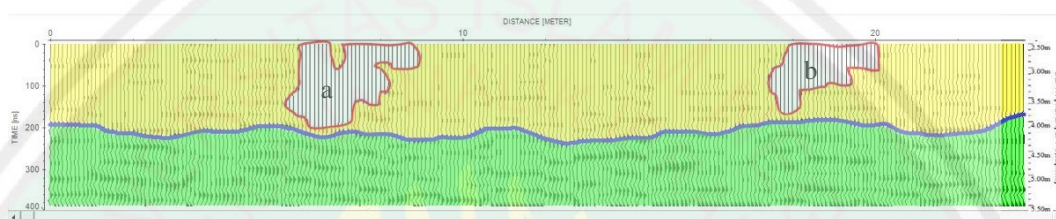


Gambar 4.11 Hasil Radargram Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan pada *Software Reflex2DQuick* Line C. (a) pendugaan rongga

Pada daerah pengambilan data tersebut posisi line C tidak berada tepat di atas permukaan gua, *scan* data dimulai dari posisi (selatan) ke (utara). Berdasarkan hasil pengukuran didapatkan hasil interpretasi posisi sebuah gua berada pada jarak 0 sampai 3 meter dari titik awal pengukuran dilihat dari adanya sinyal dengan pola (lurus) dan diameter sumbu lateral gua yaitu sekitar 3 meter. Litologi batuan bawah permukaan pada line C terdiri atas batuan gampingpasiran (warna kuning) dengan nilai ini kecepatan ($v= 0,11-0,15$ m/ns), dan batuan gamping (warna hijau) dengan nilai kecepatan ($v= 0,11-0,12$ m/ns).

m/ns). Posisi gua pada line C berada pada batuan gampingpasiran, ketebalan batuan gampingpasiran pada semua line bervariasi secara lateral, posisi batuan gampingpasiran berada dibagian atas dan batuan gamping pada posisi bawahnya, ketebalan batuan gamping tidak diketahui karena yang terdeteksi hanya bagian atasnya saja.

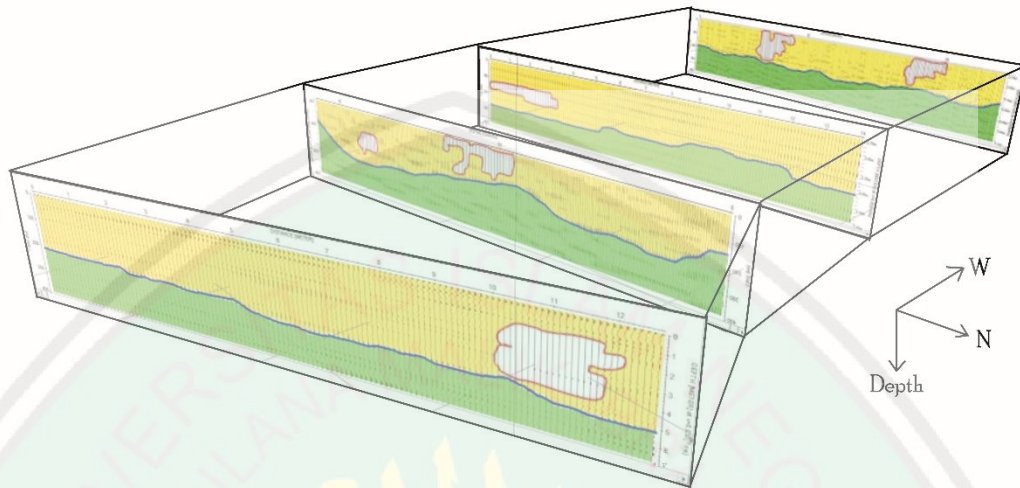
4. Pada Line D



Gambar 4.12 Hasil Radargram Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan pada *Software Reflex2DQuick* Line D. (a) gua Seneri (b) pendugaan rongga

Pada daerah pengambilan data tersebut posisi line D berada tepat di atas permukaan gua Seneri, *scan* data dimulai dari posisi (selatan) ke (utara). Berdasarkan hasil pengukuran didapatkan hasil interpretasi posisi dua buah gua berada pada jarak 6 sampai 9 meter dan 17,5 sampai 20 meter dari titik awal pengukuran yang ditunjukkan dengan adanya sinyal yang memiliki pola (lurus) dan diameter sumbu lateral gua yaitu sekitar 3 meter dan 2,5 meter. Litologi batuan bawah permukaan pada line D terdiri atas batuan gampingpasiran (warna kuning) dengan nilai ini kecepatan ($v= 0,11-0,15$ m/ns), dan batuan gamping (warna hijau) dengan nilai kecepatan ($v= 0,11-0,12$ m/ns). Posisi gua pada line D berada pada batuan gampingpasiran, ketebalan batuan gampingpasiran pada semua line bervariasi secara lateral, posisi batuan gampingpasiran berada dibagian atas dan batuan gamping pada posisi

bawahnya, ketebalan batuan gamping tidak diketahui karena yang terdeteksi hanya bagian atasnya saja.



Gambar 4.13 Hasil Penentuan Posisi Gua dan Penentuan Jenis Batuan 3 Dimensi

4.2 Integrasi Penelitian Dengan Al-Qur'an dan Hadist

Al-Qur'an merupakan pedoman bagi manusia yang di dalamnya menjelaskan hampir seluruh perihal kehidupan makhluk hidup yang ada di dunia ini. Sebagai umat islam sudah semestinya kita tidak hanya membaca Al-Qur'an dan menjadikannya pedoman hidup saja melainkan kita juga perlu mentadaburi atau merenungkan kandungan-kandungan di dalam Al-Qur'an dan mengambil hikmahnya. Sejumlah ayat Al-Qur'an juga membahas tentang jagat raya dengan segala bagian-baginnnya (langit, bumi, benda mati dan makhluk hidup yang ada, serta berbagai fenomena alam jagat raya). Isyarat-isyarat itu menunjukkan bukti (*istidlal*) atas kekuasaan Allah yang tak terbatas, ilmu dan hikmah (kebijaksanaan)-Nya yang sangat sempurna dalam menciptakan jagat raya ini.

Allah SWT berfirman dalam Al-Qur'an surat An-Naml ayat 61:

أَمَّنْ جَعَلَ الْأَرْضَ قَرَارًا وَجَعَلَ خَلَلَهَا أَنْهْرًا وَجَعَلَ لَهَا رُوسَى وَجَعَلَ بَيْنَ الْبَحْرَيْنِ حَاجِزًا ۗ أَلَيْسَ اللَّهُ بِأَعْلَمَ بِأَكْثَرِهِمْ لَا يَعْلَمُونَ ٦١

Artinya:

“Atau siapakah yang telah menjadikan bumi sebagai tempat berdiam, dan yang menjadikan sungai-sungai di celah-celahnya, dan yang menjadikan gunung-gunung untuk (mengkokohkan)nya dan menjadikan suatu pemisah antara dua laut? Apakah disamping Allah ada tuhan (yang lain)? Bahkan (sebenarnya) kebanyakan dari mereka tidak mengetahui.” (QS. An-Naml: 61) (Al-Qur’an dan Terjemah, 2008).

Pada ayat di atas dijelaskan bahwa Allah SWT telah menjadikan bumi sebagai tempat berdiam atau sebagai tempat tinggal makhluk, sehingga dibuat-Nya tidak bergoncang supaya nyaman untuk ditempati. Kemudian menjadikan di celah-celahnya terdapat sungai-sungai sebagai jalan air untuk sumber kehidupan makhluk di bumi ini dan kemudian menjadikan gunung-gunung sebagai pengokoh bumi atau dengan kata lain paku bumi.

Gunung-gunung mencengkram lempengan-lempengan kerak bumi dengan memanjang ke atas dan ke bawah permukaan bumi pada titik-titik pertemuan lempengan-lempengan ini. Dengan cara ini dapat mencegah kerak bumi dari terombang-ambing di atas lapisan magma atau di antara lempengan-lempengannya. Gunung juga dijadikan sebagai suatu pemisah antara dua laut, antara air tawar dan air asin, agar satu sama lainnya tidak bercampur baur supaya air tersebut dapat dimanfaatkan untuk seluruh makhluk di bumi ini.

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa Allah SWT menciptakan bumi dan seisinya agar semua makhluk bersyukur, sekaligus berfikir tentang keajaiban ciptaan-Nya. Betapa tidak menakjubkan, setiap saat bumi bergerak bagaikan berenang di angkasa, namun penghuninya yang ada di permukaannya tidak merasakan gerakan itu, bahkan tidak terjatuh dan tergelincir. Allah SWT

menciptakan ini semua agar makhluk-Nya bisa menetap dengan tenang serta bisa memanfaatkan dengan baik segala kenikmatan yang diberikannya oleh Allah SWT sebagai bentuk rasa syukur atas ciptaan-Nya.

Diantara kekuasaan-Nya juga diciptakan bentang alam yang berbentuk gua yang pada penelitian kali ini menjadi objek penelitian, bentuk dan wujud syukur kita kepada Allah SWT yaitu dengan memanfaatkan sebaik mungkin segala kenikmatan yang Allah SWT beri yaitu dengan menjaga, melestarikan dan memanfaatkan ilmu yang kita punya untuk mempelajari semua yang ada di jagat raya ini termasuk bentang alam seperti gua tersebut dengan melakukan riset atau penelitian-penelitian yang berguna bagi pelestarian alam agar timbulnya bencana alam bisa dicegah.

Geofisika merupakan suatu cabang ilmu kebumihan yang mempelajari bumi dari sifat-sifat dan prinsip-prinsip fisika. Manfaat dari penelitian geofisika yaitu dapat mengetahui kondisi di bawah permukaan bumi dengan cara melakukan pengukuran di atas permukaan bumi dengan menggunakan parameter-parameter fisika batuan di dalam bumi. Penerapan geofisika umumnya digunakan dalam bidang eksplorasi.

Allah SWT juga berfirman dalam Al-Qur'an surat Al-Imran ayat 190-191:

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لآيَاتٍ لِأُولِي الْأَبْصَارِ ۝
 الَّذِينَ يَذْكُرُونَ اللَّهَ قِيَامًا وَقُعُودًا وَعَلَىٰ جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ
 هَذَا بَاطِلًا سُبْحَانَكَ فَقِنَا عَذَابَ النَّارِ ۝

Artinya:

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal” (190). “(Yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya berkata): “Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia,

Maha Suci Engkau, maka peliharalah kami dari siksa neraka” (191). (QS. Al-Imran: 190-191) (Al-Qur’an dan Terjemah, 2008).

Surat Al-Imran ayat 190 dan ayat 191 ini menjelaskan bahwa penciptaan langit dan bumi yang telah sempurna beserta segala macam atributnya berupa planet-planet, galaksi, laut yang membentang, perkebunan, pepohonan, serta adanya pergantian siang dan malam, merupakan bukti jelas keesaan, keagungan, dan kekuasaan Allah SWT bagi para ulul albab. Yakni orang-orang yang berakal, orang-orang yang mau berpikir, orang-orang yang mau memperhatikan alam, orang-orang yang kritis. Hati dan lisannya selalu berzikir mensucikan dan mengagungkan kekuasaan Allah SWT disetiap waktu dan keadaan. Akalnya digunakan untuk berpikir mentadaburi keindahan ciptaan-Nya, semua ini dilakukan agar memperoleh kekuatan iman dan ketundukan kepada Allah secara sempurna.

Sebagai makhluk hidup yang berakal dan berfikir sudah seharusnya kita betul-betul memahami bahwa semua penciptaan tersebut tidak ada satupun yang sia-sia. Semuanya penuh dengan manfaat dan hikmah besar di baliknya, sehingga pasti ada balasan pahala dan siksaan di setiap ketentuan yang telah ditetapkan. Jika ulah tangan manusia sampai menyebabkan bencana alam efeknya akan kita rasakan sendiri, bencana yang terdapat dalam Al-Qur’an setidaknya memiliki dua fungsi. Adapun fungsi yang pertama sebagai ujian atau pelajaran yang diistilahkan dengan *al-bala’*. Ujian ini dapat diekspresikan dalam bentuk sesuatu yang baik maupun buruk. Sedangkan fungsi yang kedua adalah sebagai peringatan *al-nakal* dan hukuman *al-‘uqubah* atau dalam terminologi Al-Qur’an disebut *al-‘azab*. Fungsi yang kedua ini terus berlangsung, baik di dunia maupun di akhirat.

Sebagai muslim yang bertaqwa serta beriman kepada Allah SWT hendaknya bisa mengambil hikmah dari adanya suatu bencana alam yang terjadi. Oleh karena itu, kita sebagai makhluk hidup yang diberi akal untuk senantiasa bersikap baik dengan alam peduli dengan alam dengan begitu alam juga akan bersikap baik kepada kita.

Hal tersebut didukung oleh salah satu hadist riwayat Abu Dawud No. 4941 dan At-Thirmidzi No. 1924 dan dishahihkan oleh Syaikh Albani dalam as-Shahihah No. 925 yang berbunyi:

الرَّاحِمُونَ يَرْحَمُهُمُ الرَّحْمَانُ، إِزْحَمُوا مَنْ فِي الْأَرْضِ يَرْحَمَكُم مَّن فِي السَّمَاءِ

Artinya:

“Para pengasih dan penyayang dikasihi dan disayang oleh Ar-Rahmaan (Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang), rahmatilah yang ada di bumi niscaya kalian akan dirahmati oleh Dzat yang ada di langit” (HR Abu Dawud no 4941 dan At-Thirmidzi no 1924 dan dishahihkan oleh Syaikh Albani dalam as-Shahihah no 925).

Seperti sabda Nabi Muhammad SAW rahmatilah segala yang ada di muka bumi ini dengan konteks umum, bukan hanya merahmati manusia atau makhluk yang hidup seperti hewan dan tumbuhan melainkan juga mencakup benda mati seperti bentang alam di antaranya gunung, laut, sungai, gua dan seluruh ciptaan Allah SWT yang ada di muka bumi. Hal ini menjadi indikator bagaimana menjadi mukmin yang sebenarnya. Eksistensi manusia sebenarnya ditentukan oleh kemanfaatannya pada yang lain.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil interpretasi data dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan gua bawah tanah yang terdeteksi pada Line A, Line B, Line C, dan Line D.
2. Metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) dapat mendeteksi litologi batuan bawah permukaan yang teridentifikasi sebagai batuan gampingpasiran dan batuan gamping pada masing-masing Line A, Line B, Line C, dan Line D.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan menggunakan antena dengan frekuensi yang rendah agar dapat mencapai target yang lebih dalam. Sedangkan saran untuk masyarakat agar dapat mengambil langkah-langkah nyata dalam melestarikan keberadaan gua bawah tanah untuk pengembangan wisata alam.

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, N.T., Helmi, M., Santosa, L.W., Budi, S., dan Djaka M., 2004. *Teknik Inverse Modelling Untuk Pendugaan Potensi dan Proses Hidrogeokimia Airtanah Pada Berbagai Kondisi Akuifer*. Laporan Penelitian. Hibah Bersaing XII. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi. Yogyakarta: Lembaga Penelitian, Universitas Gadjah Mada.
- Al-Qur'an dan Terjemah., 2008. Departemen Agama RI. Bandung. Diponegoro.
- Astutik S., 1997. *Penggunaan Ground Penetrating Radar (GPR) Sebagai Metal Detector*, Jurnal Ilmu Dasar, Vol.2 No. 1, 2001 : 9-16. Mala Geoscience.
- Bahri S. Ayi., 2009. *Penentuan Karakteristik Dinding Gua Seropan Gunung Kidul dengan Metode Ground Penetrating Radar*. Surabaya: ITS.
- Budiono, K., 2010. *Penafsiran Struktur Geologi Bawah Permukaan di Kawasan Semburan Lumpur Sidoarjo, Berdasarkan Penampang Ground Penetrating Radar (GPR)*. Jurnal Geologi Indonesia, Vol.5 No.3. Bandung: Pusat Peneliti dan Pengembangan Geologi Kelautan.
- Chamberlain, A.T. and Sellers, W. Proctor C., 2000. *Cave Detection In Limestone Using Ground Penetrating 12 Radar*. *Journal Of Archaeological Science*. [Http://Geoful.Wordpress.Com/Metode-Geofisika.Html](http://Geoful.Wordpress.Com/Metode-Geofisika.Html). di Akses pada Kamis 13 Februari 2020.
- Davis and Anan., 1989. *Field Observations Of Electromagnetic Pulse Propagation In Dielectric Slabs*, Geophysics, Vol 49, No. 10, 1763-1773.
- Eko Haryono., 2004. *Geomorfologi Karst*, dalam Eko Haryono dan Tjahyono Nugroho Adji (ed). 2004. *Pengantar Geomorfologi dan Hidrologi Karst*. Yogyakarta: Fakultas Geografi Universitas Gajah Mada.
- Ford, D. and Williams, P., 1992. *Karst Geomorphology and Hydrology*, Chapman And Hall, London.
- Frank Lehmann and Alan G. Green., 1999. *"Semi-Automated Georadar Data Acquisition In Three Dimensions. Switzerland"* Swiss Federal Institute Of Tecbology, Institute Og Geophysics, Eth-Honggerberg, Ch-8093 Zurich.
- Google Earth, *Citra Google Maps.*, di Akses pada Kamis 13 Februari 2020.
- Griiffiths, D.J., and College R., 1999. *Introduction To Electrodynamics*, Prentice Hall, United States Of America.
- Jol, Harry M., 2009. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Amsterdam. Elsevier.

- Kusumayudha, S. B., 2017. *Mengenal Hidrogeologi Karst*. Pohon Cahaya, Yogyakarta.
- Langer, W.H., 2001. *Potential Environmental Impacts Of Quarrying Stone In Karst- A Literature Review. Open File Report*. U.S. Geological Survey, USA.
- Martodjojo dan Djuhaeni., 1996. *Sandi Stratigrafi Indonesia, Komisi Sandi Stratigrafi Indonesia*, Ikatan Ahli Geologi Indonesia, Bandung.
- Muhyi, Sumarsono., 2005. *Deteksi Kabel Listrik Bawah Tanah Dengan Otomata*, STMIK, Indonesia: Jakarta.
- Nahrowi, N. Y. & Suratman., 1978. *Aspek Stratigrafi, Sedimentologi dan Potografi Endapan Turbidit (Studi Kasus: Formasi Kerek & Anggota Banyak Daerah Kedungjati, Jawa Tengah)* Proc.19 Th Ann. Conv. Indon. Assoc. Geol. (IAGI).
- Natuschka, M.L., Daniela, B.M., Roman, A., Lubomir, K., Cesareo, Saiz-Jimenez, Sushmitha, B., Ramanathan, B., Wolfgang, L., Megan, L.P., And A.S. Engel., 2012. *Caves and Karst Environments*. The British Library, London, UK.
- Nuraini, Fahad., 2012. *Kajian Karakteristik dan Potensi Kawasan Karst Untuk Pengembangan Ekowisata di Kecamatan Ponjong Kabupaten Gunungkidul*, Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Pratomo, I., 2006. *Klasifikasi Gunung Api Aktif Indonesia, Studi Kasus Dari Beberapa Letusan Gunung Api dalam Sejarah*. Jurnal Geologi Indonesia. Vol.1 No.4 2006 209-227.
- Reynolds, J.M., 1997. *An Introduction To Applied and Environmental Geophysics*.
- Shofiana, Anggun., 2016. *Identifikasi Gua Bawah Tanah Pada Struktur Gamping Berdasarkan Interpretasi Data Ground Penetrating Radar (GPR)*. Skripsi. Malang: UIN Maulana Malik Ibrahim.
- Sujanto, Hadisusanto, R., Kusnama, Chaniago, R. dan Baharuddin, R., 1992. *Peta Geologi Lembar Turen, Jawa; Skala 1 : 100.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Sulaiman, A., dan Taufik, M., 2013. *Pemodelan Georadar 2D dengan Metode Beda Hingga Domain Waktu*. [Http://Ejurnal.Bppt.Go.Id/Index./Article/View/625/583](http://Ejurnal.Bppt.Go.Id/Index./Article/View/625/583). di Akses pada Kamis 13 Februari 2020.

- Supriyanto., 2007. *Perambatan Gelombang Elektromagnetik*, Fisika-FMIPA UI: Jakarta.
- Sutikno dan Eko Haryono., 2000. *Perlindungan Fungsi Kawasan Karst. Seminar Perlindungan Penghuni Wilayah Karst: Masa Lalu, Masa Kini dan Masa Yang Akan Mendatang Terhadap Fungsi Lingkungan Hidup*. PLMS UNS. Surakarta 11 November 2000.
- Sweeting, M.M., 1972. *Karst Landforms*, Macmillan, London.
- Thonbury, W.D., 1969. *Principles Of Geomorphology*, John Wiley and Sons Inc., New York, U.S.A.
- Tjahyo Nugroho Adji, Eko Haryono dan Suratman Worosuprojo., 1999. *Kawasan Karst dan Prospek Pengembangannya di Indonesia*. Seminar Pertemuan Ilmiah Tahunan Ikatan Geograf Indonesia. Jakarta 26-27 Oktober 1999. Universitas Indonesia.
- Van Zuidam, Et, Al., 1983. *Guide To Geomorphologic Aerial Photographic Interpretation and MAPPING*.
- Warnana, D. D., 2008. *Identifikasi Scouring Sebagai Potensi Kelongsoran Tanggul Sungai Bengawan Solo Berdasarkan Survei GPR (Studi Kasus Desa Widang, Kabupaten Tuban)*. Jurnal Fisika dan Aplikasinya. Vol. 4 No. 2. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November.
- White, W.B., 1988. *Geomorphology and Hydrology Of Karst Terrain*. Oxford University Press, New York.
- Yulius, Yudi M., 2010. *Studi Pemrosesan dan Visualisasi Data Ground Penetrating Radar*. Jakarta: Jurnal Pusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi LIPI.

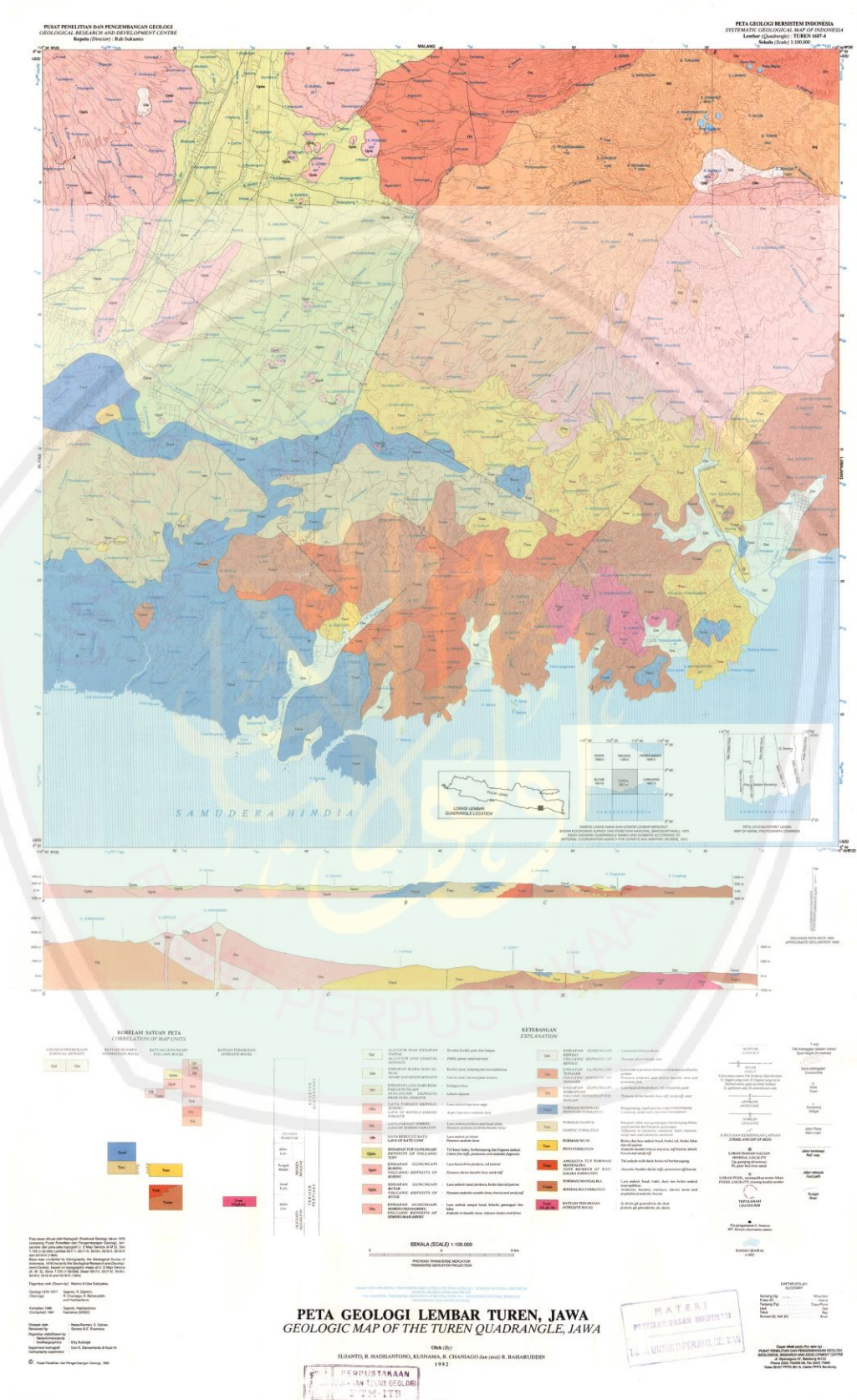


LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Penelitian



Lampiran 2 Peta Geologi Lembar Turen



Lampiran 3 Data Penelitian

Line A

Cuplikan Amplitudo (mm)	Trace			
	16	54	71	119
0	-5167.53	183.94	-2028.66	-1052.87
1	-147.53	11750.50	6053.78	-692.26
2	-2780.53	3918.88	2205.25.00	1350.59.00
3	-6736.06	-5276.69	-4011.38	-2718.21
4	-3450.12	382.13.00	669.13.00	539.95
5	-792.24	-5656.56	-3373.44	3268.49.00
6	-697.29	-1686.63	-1408.00	2634.44.00
7	4869.06.00	1003.44.00	595.47.00	1184.95
8	2152.53.00	637.50.00	959.75	1208.72
9	3443.47.00	1863.88	925.97	-299.79
10	2199.76	636.56.00	353.38.00	-20.05
11	1508.53.00	-2225.19	-443.31	-742.72
12	930.18.00	933.56.00	07.34	-15.54
13	1792.00.00	-1711.94	-346.88	85.21.00
14	2322.76	-1194.69	-784.19	-246.54
15	3611.88	-640.88	-30.25	-527.87
16	4056.65	-375.00	560.16.00	-412.38
17	4051.41.00	664.44.00	923.94	0,921527778
18	3787.24.00	-23.63	722.44.00	-112.67
19	1940.47.00	2754.38.00	1515.59.00	-182.64
20	644.82	3170.00.00	1697.63	290.23.00
21	-2745.53	-586.25	-1021.88	-8.56
22	-3355.12	457.69	-415.50	-490.64
23	-3957.12	-1556.31	-607.59	34.85
24	-3987.41	-824.19	-1638.97	-274.54
25	-3519.76	724.63	427.06.00	354.87
26	-3822.82	-3246.13	-1372.50	174.21.00
27	-3623.29	1454.38.00	178.41.00	-501.33
28	-3241.24	30.19.00	887.00.00	450.51.00
29	-4832.88	48.69	-902.19	45.51.00
30	-4587.00	2119.75	557.75	467.69
31	-4866.12	-869.88	-188.03	376.85
32	-3882.24	1048.38.00	-343.66	-57.26
33	-969.82	-1549.38	-714.88	646.33.00
34	1103.71	-1306.75	-682.13	-781.79
35	4329.12.00	265.94	470.41.00	381.95
36	5864.41.00	-4950.63	-2071.41	-94.95
37	7752.18.00	1806.69	1086.41.00	-1373.36
38	8529.53.00	2732.81	1745.09.00	1269.79
39	6721.76	-2310.44	-2220.19	-694.62

40	6028.94	1543.25.00	1315.75	-1561.69
41	5266.76	-870.75	1636.53.00	478.36.00
42	2974.71	1047.50.00	757.22.00	704.67
43	1953.24.00	354.25.00	-12.91	-51.54
44	611.47.00	2770.94	1110.53.00	-128.92
45	1227.65	3495.38.00	1469.47.00	1020.46.00
46	233.18.00	-6823.94	-3932.56	-566.28
47	540.71	-2177.69	-1264.44	-1484.00
48	2669.82	1436.69	2306.41.00	862.97
49	2003.41.00	-3395.31	-2399.31	635.77
50	1472.24.00	1060.19.00	405.63	-1589.36
51	-992.29	1563.56.00	2886.84	-312.97
52	-5244.53	2441.31.00	285.41.00	-20.72
53	-8697.94	4620.81	1671.63	42.79
54	-11699.35	245.56.00	-82.56	794.38.00
55	-11550.29	236.44.00	-1134.00	396.90
56	-9556.00	-2853.19	-1830.31	-42.64
57	-8124.65	-916.31	-1122.19	-134.62
58	-3905.47	-250.44	-269.47	1031.95

Line B

Cuplikan Amplitudo (mm)	Trace			
	51	100	147	209
0	-2268.81	-2426.32	-1269.79	-313.86
1	833.56.00	40.45.00	-2004.05	-68.00
2	1341.59.00	1263.61	1821.34.00	-1437.57
3	-1240.07	-368.58	-544.55	-480.43
4	2350.70	1367.23.00	-595.95	351.14.00
5	1443.07.00	1307.45.00	2099.18.00	893.71
6	-259.15	617.90	1460.05.00	1394.14.00
7	310.67	947.58.00	-906.74	749.43.00
8	-1074.30	-376.65	-97.39	-256.43
9	-805.07	-860.29	-503.50	645.14.00
10	-28.48	-212.19	-547.45	-506.57
11	-594.96	-626.19	170.39.00	-1223.29
12	270.89	-574.10	504.08.00	273.29.00
13	286.30.00	576.87	132.16.00	-729.14
14	-334.96	206.71	-51.26	-267.00
15	2057.56.00	280.00.00	1051.97	925.43.00
16	669.85	848.74	-350.68	-84.29
17	-1437.85	180.68	10.53	-258.71
18	-767.15	-347.58	-43.05	-25.57

Line C

Cuplikan Amplitudo (mm)	Trace			
	15	63	97	136
0	-1237.22	-1578.00	-3066.47	-3116.50
1	1532.19.00	1012.56.00	-1509.47	75.11.00
2	-5903.97	1323.94	-2903.60	-167.86
3	452.97	-2735.38	-2189.33	-3188.18
4	1295.94	4366.81	-377.60	1550.50.00
5	-3429.14	-1577.88	-2051.27	-354.00
6	2333.89	-2684.81	-2314.87	-623.18
7	974.61	4316.81	1618.33.00	-421.89
8	-2108.36	-2917.31	-1823.07	-1889.00
9	2299.03.00	557.00.00	1039.20.00	320.04.00
10	1523.67	1655.75	1587.13.00	1755.54.00
11	-836.83	-2083.44	-1592.60	-2128.64
12	210.53.00	877.63	2469.53.00	2277.61
13	246.78	-3080.19	1147.40.00	519.36.00
14	-241.33	1404.50.00	-3017.60	-2674.75
15	-719.94	703.13.00	550.60	1160.64
16	366.14.00	-2848.19	2803.40.00	1076.71
17	20.00	2464.50.00	-2626.20	176.32.00
18	-539.14	543.19.00	-585.13	-209.07
19	1186.53.00	-1182.19	445.00.00	97.50.00
20	935.22.00	2261.56.00	1396.40.00	1411.64
21	-780.69	-1462.31	1741.73	521.39.00
22	2351.19.00	-2274.81	-2302.33	-76.82
23	289.78	924.06.00	-1644.27	-1033.04
24	-1857.83	-133.38	1615.53.00	-1654.96
25	-1507.22	-2985.81	-2235.87	109.61
26	102.17.00	477.88	-5221.93	-2311.79

Line D

Cuplikan Amplitudo (mm)	Trace			
	57	127	175	202
0	2420.93	-3782.25	-7407.13	-1813.08
1	-2255.90	420.79	1862.06.00	-2034.83
2	644.17.00	-931.02	673.08.00	3362.17.00
3	-444.24	-808.62	-3990.11	-631.58
4	-1537.55	-2100.05	-374.02	-1124.67
5	1046.56.00	-517.46	-484.31	1445.58.00
6	-1103.01	-598.02	-861.01	-3268.50
7	-1213.13	-1862.42	-2170.96	654.67
8	2428.26.00	1715.68	1179.93	-133.42

9	-3283.73	-967.16	-1355.11	-1562.25
10	1558.64	-709.08	-1278.74	1781.58.00
11	2578.53.00	2986.65	1898.37.00	896.17.00
12	-3013.64	-2475.47	-1569.46	-265.25
13	1020.16.00	1142.37.00	-90.24	346.92
14	-1715.18	361.27.00	873.23.00	-1672.25
15	1159.19.00	-4105.96	-1828.23	607.67
16	-342.84	1926.08.00	1127.80	-1404.92
17	-1375.27	387.44.00	656.44.00	-250.50
18	3302.21.00	-575.59	-2864.25	1806.92
19	-1020.98	-337.94	1096.90	-1577.75
20	1872.13.00	717.34.00	1279.70	2781.25.00
21	2923.40.00	3847.78	-1562.20	-78.25
22	-1446.96	-1216.52	740.06.00	365.83
23	573.68	-546.16	1378.76	570.67
24	-2105.51	686.44.00	-588.64	-1188.58
25	783.89	-4467.97	-948.10	1051.33.00
26	-705.87	882.60	2262.15.00	-1173.00
27	-2965.04	-259.64	-1928.60	-1118.75
28	203.06.00	-2308.78	-757.41	-377.92
29	555.49.00	3228.41.00	4364.45.00	-993.92
30	-186.94	-1216.64	-3860.47	766.08.00



Lampiran 4 Perhitungan

LINE		d (meter)	t (ns)	v (m/ns)
A	16	1	14,06	0,14
	54	0,9	12,5	0,14
	71	1	15,62	0,12
	119	0,8	12,5	0,12
B	51	0,7	10,93	0,13
	100	0,6	7,82	0,15
	147	0,6	9,38	0,12
	209	0,4	6,25	0,12
C	15	0,6	7,81	0,15
	63	0,6	7,82	0,15
	97	0,5	7,81	0,12
	136	0,4	6,25	0,12
D	57	1,1	14,06	0,15
	127	1,3	17,18	0,15
	175	0,4	6,25	0,12
	202	0,4	6,25	0,12

Lampiran 5 Gua Lokasi Penelitian





KEMENTERIAN AGAMA RI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI (UIN)
MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
JURUSAN FISIKA

Gedung B.J. Habibie Lt. 2 Fak. Saintek Jl. Gajayana No. 50 Malang 65144 Telp. (0341) 558933

BUKTI KONSULTASI SKRIPSI

Nama : MEITIA RATNA FALI
NIM : 16640002
Fakultas/ Jurusan : Sains dan Teknologi/Fisika
Judul Skripsi : Identifikasi Gua Bawah Tanah Berdasarkan Interpretasi Data *Ground Penetrating Radar* (GPR)
Pembimbing I : Irjan, M.Si
Pembimbing II : Ahmad Abtokhi, M.Pd

No.	Hari/Tanggal	HAL	Tanda Tangan
1	Rabu/12 Februari 2020	Konsultasi Bab I, II, dan III	
2	Rabu/19 Februari 2020	Konsultasi Bab I, II, dan III	
3	Kamis/27 Februari 2020	Konsultasi Bab I, II, III dan ACC	
4	Rabu/12 Agustus 2020	Konsultasi Data Hasil Bab IV	
5	Selasa/8 September 2020	Konsultasi Data Hasil Bab IV	
6	Jumat/02 Oktober 2020	Konsultasi Data Hasil Bab IV	
7	Senin/12 Oktober 2020	Konsultasi Bab IV	
8	Selasa/20 Oktober 2020	Konsultasi Bab IV	
9	Senin/9 November 2020	Konsultasi Kajian Agama	
10	Selasa/10 November 2020	Konsultasi Bab IV dan ACC	
11	Kamis/10 Desember 2020	Konsultasi semua Bab	
12	Sabtu/19 Desember 2020	Konsultasi semua Bab dan ACC	

Malang, 21 Desember 2020

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika

Drs. Abdul Basid, M.Si
19650504 199003 1 003