

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

**(Studi Kasus di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak,
Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur)**

SKRIPSI

Oleh:

ANGGUN SHOFIANA

NIM. 12640055



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2016**

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

**(Studi Kasus di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak,
Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur)**

SKRIPSI

Oleh:

ANGGUN SHOFIANA

NIM. 12640055



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2016**

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

**(Studi Kasus di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten
Malang, Provinsi Jawa Timur)**

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:

**ANGGUN SHOFIANA
NIM. 12640055**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2016**

HALAMAN PERSETUJUAN

IDENTIFIKASI GUA BAWAH TANAH PADA STRUKTUR GAMPING
BERDASARKAN INTERPRETASI DATA GROUND PENETRATING RADAR
(GPR)

(Studi Kasus di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten
Malang, Provinsi Jawa Timur)

SKRIPSI

Oleh:

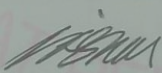
ANGGUN SHOFIANA

NIM. 12640055

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji,
Pada tanggal: 05 Agustus 2016

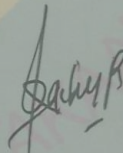
Pembimbing I,

Pembimbing II,



Irjan, M.Si

NIP. 19691231 200604 1 003



Ahmad Abtokhi, M.pd

NIP. 19761003 200312 1 004

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika



Erna Hastuti, M. Si

NIP. 19811119 200801 2 009

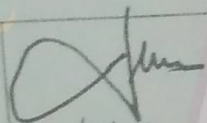
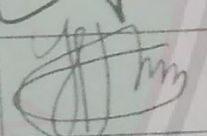
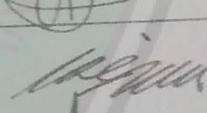
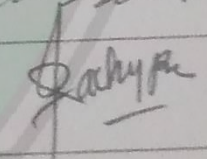
HALAMAN PENGESAHAN

IDENTIFIKASI GUA BAWAH TANAH PADA STRUKTUR GAMPING
BERDASARKAN INTERPRETASI DATA GROUND PENETRATING
RADAR (GPR)
(Studi Kasus di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten
Malang, Provinsi Jawa Timur)

SKRIPSI

Oleh:
ANGGUN SHOFIANA
NIM.12640055

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal: 30 Agustus 2016

Penguji Utama	:	<u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP. 19650504 199003 1 003	
Ketua Penguji	:	<u>Imam Tazi, M.Si</u> NIP. 19740730 200312 1 002	
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


Erna Hashuti, M.Si
NIP. 19811119 200801 2 009

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : ANGGUN SHOFIANA

NIM : 12640055

Jurusan : FISIKA

Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI

Judul Penelitian : Identifikasi Gua Bawah Tanah Pada Struktur Gamping Berdasarkan Interpretasi Data Ground Penetrating Radar (GPR) (Studi Kasus di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten Malang)

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 kutipan 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, 31 Agustus 2016
Yang Membuat Pernyataan,

METERAI
TEMPEL

24530ADF04672001

6000
ENAM RIBURUPIAH

ANGGUN SHOFIANA
NIM. 12640055

MOTTO

Never give up, never lose control and stay focus to reach every single dream in every single moment that we have !

<> الْوَقْتُ أَثْمَنُ مِنَ الذَّهَبِ <>

Berangkat dengan penuh keyakinan. Berjalan dengan penuh keikhlasan. Istiqomah dalam menghadapi cobaan. YAKIN, IKHLAS, ISTIQOMAH

وَالْعَصْرِ ﴿١﴾ إِنَّ الْإِنْسَانَ لَفِي خُسْرٍ ﴿٢﴾ إِلَّا الَّذِينَ ءَامَنُوا وَعَمِلُوا الصَّالِحَاتِ
وَتَوَاصَوْا بِالْحَقِّ وَتَوَاصَوْا بِالصَّبْرِ ﴿٣﴾

“Demi masa. Sesungguhnya manusia itu benar-benar berada dalam kerugian, kecuali orang-orang yang beriman dan mengerjakan amal saleh dan nasehat menasehati supaya mentaati kebenaran dan nasehat menasihati supaya menetapi kesabaran” (QS. Al-Ashr: 1-3)

الوقت كالشيف ان لم تقطعها قطعك

*“Waktu itu bagaikan pedang, jika kamu tidak memanfaatkannya menggunakan untuk memotong, ia akan memotongmu (menggilasmu)”
(H.R. Muslim)*

HALAMAN PERSEMBAHAN

Sembah sujud serta syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, ridho dan hidayah-Nya yang telah membekaliku dengan ilmu, mengenalkanku dengan cinta dan memberikan kekuatan, kesehatan serta kesabaran kepadaku dalam menyelesaikan skripsi ini. Sholawat dan salam selalu tercurahkan keharibaan baginda Rosululloh Muhammad SAW.

Kupersembahkan karya sederhana ini untuk kedua orang tuaku yang sangat kukasih dan kusayangi, Bapak (Agung Gumolo) dan Ibu (Lilik Suhartatik), yang tiada pernah hentinya selama ini memberiku semangat, doa, dorongan, nasehat, cinta dan kasih sayang serta pengorbanan yang tak tergantikan. Karya sederhana ini kusembahkan kepada njenengan sebagai tanda bakti, hormat dan rasa terima kasih yang tak terhingga.

Terima kasih yang tak terhingga teruntuk Romo KH. Makinuddin Qomari berserta Bu Nyai Wahidah Ismail, guru-guruku dan dosen-dosenku, terutama pembimbingku (Bpk Irjan, M.Si dan Bpk Ahmad Abtokhi, M.pd) yang tak pernah lelah dan sabar memberikan bimbingan dan arahan kepadaku. Serta bapak dan ibu dosen yang sangat menginspirasi (Bpk Drs. Abdul Basid, M.Si, Bpk (Alm) Novi Avisena, M.si, Ibu Erna Hastuti, M.Si, Bpk Agus Muhyono, SPd M.Kes, Ibu Umayyatus Syarifah, MA, Ibu Erika, M.Si, Bpk Farid Samsu Hananto, M.T, Bpk Imam Tazi, M.Si, Bpk Tirono, M.Si dan Bpk Agus Krisbiantoro, M.Si). Semoga ilmu yang diberikan mampu menjadi penerang hidup kami.

*Teruntuk adikku sayang (M. Duwi Raharjo) dan mas Nasich Luthify, Yes,,
akhire aku wisudah!!!! B-) :D*

Makasih ya buat waktu, dukungan dan doa kalian : :**

Terlalu berat untuk mengandalkan diri sendiri tanpa melibatkan bantuan orang lain. Terima kasih buat tim akuisisi yang telah membantu dari geofisika UIN Malang (Mas Nasich, Memed, Mbak Midah, Ifham, Lukman, Faiz, Asy'ari, Mas Aziz, Naila) dan Mas Asisten (Jhonatan A. Hutabarat) terima kasih atas bantuan dan ilmunya.

Teruntuk teman-teman geofisika yang selalu membantu, berbagi keceriaan dan melewati suka dan duka selama ini. (Vivi, Zha, Muti', Fatin, Nuris, Mbak wawa, Mama U.ul, Putri, Enthong, Mbak A.at, Hani, Memed, Munshorip,

Huda, Asy'ari, Aves, Saipul, Naila, Mas dan Mbak geofisika' 10, Mbak Bro, Mbak fika, Mbak icha, Mbak Nita, Mas Nasich, Mas Aji, Mas Bahar, Mbak Siro, Mas Syifa', Mas Atho' dan adik-adik geofisika' 13), Kalian semua bukan hanya menjadi kakak, teman dan adik yang baik, kalian adalah saudara bagiku, terima kasih atas dukungan dan doanya.

Terima kasih juga ku persembahkan kepada teman-teman seperjuangan (fisika' 12) spesial buat Afnan, Vivi dan Memed yang selalu membantu, berbagi keceriaan dan melewati setiap suka dan duka selama kuliah, Maaf tidak bisa nyebut satu-persatu, pokoknya kalian semua luar biasa, terimakasih banyak ya teman-teman.

Terimakasih juga buat temen-temen penghuni kos Wisma Catalonia yang telah mewarnai hari ku selama 2 tahun ini. Bersyukur bisa menemukan teman dan saudara seperti kalian (Putri, ephitul, vava, lin, nita, grand dll), tak lupa juga buat Umik kos dan Abah kos semoga selalu dilindungi Allah.

Hanya sebuah karya sederhana ini yang dapat ku persembahkan buat kalian semua

Terima kasih beribu terimakasih kuucapkan.

By: Anggun S

KATA PENGANTAR



Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, taufik dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan studi di Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang ini berjalan dengan lancar baik. Sholawat serta salam semoga senantiasa terlimpahkan kepada Nabi Muhammad Saw., para sahabat, dan segenap orang yang mengikuti jejaknya.

Penulisan laporan yang berjudul "Identifikasi Gua Bawah Tanah Pada Struktur Gamping Berdasarkan Interpretasi Data *Ground Penetrating Radar* (GPR) (Studi Kasus di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur)" 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.

Pada kesempatan ini, penulis tidak lupa menyampaikan terima kasih dan harapan *jazakumullah al-khair* kepada semua pihak yang telah membantu, memberi pengarahan, bimbingan supaya skripsinya dapat terselesaikan dengan baik, khususnya kepada:

1. Prof. Dr. Mudjia Rahardjo, selaku Rektor Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. drh. Bayyinatul Mukhtaromah, M.Si, selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Erna Hastuti, M.Si, selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.

4. Irjan, M.Si, dan Ahmad Abtokhi, M.pd, selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan bimbingan dan pengarahan dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Segenap Civitas Akademika Jurusan Fisika, terutama seluruh dosen, laboran, dan staf karyawan yang bersedia membantu, menyediakan waktu bagi penulis untuk berbagi ilmu dan memberikan bimbingan.
6. Orangtua tercinta serta segenap keluarga yang selalu mendo'akan, memberi kepercayaan dan memberikan motivasi kepada penulis dalam menuntut ilmu.
7. Teman-teman yang selalu memberikan motivasi, inspirasi, dan kebersamaannya selama ini.
8. 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 konstruktif sangat diharapkan demi kemajuan bersama. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberi manfaat dan menambah khazanah ilmu pengetahuan. *Amin Ya Rabbal Alamin.*

Malang, Agustus 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
---------------------	---

HALAMAN PENGANTAR	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
ABSTRAK	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	8
1.4 Manfaat Penelitian.....	8
1.5 Batasan Masalah	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Kawasan Karst dan Karakteristiknya	10
2.2 Akuifer.....	20
2.3 Potensi dan Karakteristik Kawasan Karst	22
2.4 Pengolahan dan Pelestarian Kawasan Karst.....	23
2.5 Sungai Bawah Permukaan	25
2.6 Teori <i>Sinkhole</i>	28
2.7 Geolombang Elektromagnetik.....	31
2.8 <i>Ground Penetrating Radar (GPR)</i>	36
2.8.1 Radar.....	36
2.8.2 Sistem Radar.....	36
2.8.3 Prinsip Kerja GPR	38
2.8.4 Parameter Antena GPR.....	45
2.8.5	
BAB III METODE PENELITIAN	52
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	52
3.2 Data Penelitian.....	53
3.3 Peralatan Penelitian	53
3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian	54
3.4.1 Tahap Pra Akuisisi Data	54
3.4.2 Tahap Akuisisi Data	54
3.4.2.1 Teknik Pengambilan Data (Akuisisi Data).....	55
3.4.2.2 Teknik Pengolahan Data.....	55
3.4.2.3 Teknik Interpretasi Data.....	56
3.4.3 Tahap Pasca Akuisisi Data	56
3.5 Diagram Alir Penelitian	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	58
4.1 Hasil Survei	58
4.1.1 Akuisisi Data.....	58
4.1.2 Desain Survei.....	62

4.1.3 Kondisi Geologi Lokasi Penelitian.....	65
4.1.4 Pengolahan Data.....	68
4.2 Pembahasan	70
4.2.1 Interpretasi Kualitatif	70
4.2.2 Analisa Visualisasi 2D	72
4.2.2.1 Analisa Area 1.....	72
4.2.2.2 Analisa Area 2.....	72
4.2.3 Analisa Visualisasi 3D	74
4.2.4 Analisa Arah Aliran Sungai Bawah Permukaan	77
4.2.5 Analisa Daerah Rawan Timbulnya <i>Sinkhole</i> /Luweng	80
4.2.6 Upaya Mitigasi Dini Bencana Timbulnya <i>Sinkhole</i> /Luweng Baru...	81
4.2.7 Integrasi Geologi Daerah Karst/Gamping Dengan Al-Qur'an dan Hadist	84
BAB V PENUTUP	92
5.1 Kesimpulan.....	92
5.2 Saran	93
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Daerah Penelitian ((a.) Gua, (b.) <i>Sinkhole</i>).....	7
---	---

Gambar 2.1	Perbandingan Perkembangan Dolin pada Daerah Iklim Tropis dan Iklim Sedang.....	11
Gambar 2.2	Berbagai Tipe Dolin Berdasarkan Genetik	13
Gambar 2.3	Berbagai Tipe Polje.....	15
Gambar 2.4	Titik Asal Aliran Sungai Bawah Permukaan	26
Gambar 2.5	Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	32
Gambar 2.6	Sistem GPR.....	37
Gambar 2.7	Konsep Akuisisi Data	38
Gambar 2.8	Ketebalan Beberapa Medium Dalam Tanah	40
Gambar 2.9	Akuisisi Data GPR.....	43
Gambar 2.10	Output GPR.....	44
Gambar 2.11	<i>Late Time Ringing</i>	47
Gambar 2.12	<i>Cross-Coupling</i>	47
Gambar 2.13	Jarak Antena dengan Tanah	48
Gambar 2.14	(a) <i>Cavity Area</i> , (b) <i>Metal</i> , (c) <i>Dry Karst</i> , (d) <i>Wet Karst</i>	50
Gambar 2.15	Struktur dan Jenis Objek Digolongkan Berdasar Variasi Warna pada Output GPR <i>Future Series 2005</i>	50
Gambar 3.1	Cakupan Area Penelitian.....	52
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian	57
Gambar 4.1	Seperangkat Alat GPR <i>Future Series 2005</i>	59
Gambar 4.2	Meteran	59
Gambar 4.3	Laptop	59
Gambar 4.4	Power Tank Dihubungkan dengan Control Unit Melalui Kabel	59
Gambar 4.5	Transmitter-Receiver Terpasang pada Gagang dan Menghadap Bawah	60
Gambar 4.6	Kenampakan <i>Software Visualizer 3D</i> pada Layar Laptop	60
Gambar 4.7	<i>Control Unit Future Series 2005</i>	61
Gambar 4.8	Tombol Hijau pada <i>Control Unit</i>	61
Gambar 4.9	Proses Pengambilan Data.....	62
Gambar 4.10	Desain Survei Lokasi Pengambilan Data.....	62
Gambar 4.11	Peta Geologi Lembar Blitar	68
Gambar 4.12	<i>Output 3D GPR Future Series 2005</i>	68
Gambar 4.13	<i>Output 2D GPR Future Series 2005</i>	70
Gambar 4.14	Hasil Survei Kedua Area yang di Overlay dengan Peta Perangkat Lunak Google Earth.....	71
Gambar 4.15	Legenda Pada Output GPR <i>Future Series 2005</i>	75
Gambar 4.16	Output Visualisasi 3D	76
Gambar 4.17	Sungai Permukaan Pada Area Karst di daerah Sumbermanjing Kulon Kecamatan Pagak Kabupaten Malang.....	78
Gambar 4.18	Daerah yang Diprediksi Rawan Akan Timbulnya Bencana Sinkhole/Luweng Baru Berdasarkan Interpretasi Data GPR <i>Future Series 2005</i>	81

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sungai yang Masuk ke Dalam Sistem Sungai Bawah Permukaan ..	26
-----------	---	----

Tabel 2.2 Kecepatan dan Konstanta Dielektrik Berbagai Medium	35
Tabel 2.3 Resolusi dan Daya Tembus Gelombang Radar	42
Tabel 2.4 Data Jarak Antena dengan Tanah dengan Berbagai Variasi Permittivitas	49



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Visualisasi 2D
Lampiran 2 Data Visualisasi 3D
Lampiran 3 Aplikasi *Ground Penetrating Radar* (GPR)
Lampiran 4 Peta Geologi Lembar Probolinggo
Lampiran 5 Dokumentasi Penelitian



ABSTRAK

Anggun Shofiana. 2016. **Identifikasi Gua Bawah Tanah Pada Struktur Gamping Berdasarkan Interpretasi Data *Ground Penetrating Radar* (GPR) (Studi Kasus di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur)**. 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: Struktur Gamping, Gua Bawah Tanah, Amblesan Tanah, *Ground Penetrating Radar* (GPR) *Future Series* 2005

Pada daerah Sumbermanjing Kulon Kecamatan Pagak Kabupaten Malang banyak dijumpai adanya amblesan tanah berupa *sinkhole*/luweng yang sangat membahayakan bagi masyarakat setempat oleh karena itu dilakukan survei *Ground Penetrating Radar* (GPR) *Future Series* 2005 untuk mengidentifikasi gua bawah permukaan dan untuk mengetahui peta zona rawan amblesan tanah pada struktur gamping. Pengambilan data dilakukan pada daerah bagian sekitar gua dan daerah sekitar *sinkhole*/luweng. Total luas daerah penelitian sekitar 43 meter x 22,5 meter. Pengolahan data dilakukan dengan *software visualizer 3D* yang merupakan satu paket dengan GPR *Future Series* 2005. Berdasarkan hasil dari interpretasi secara kualitatif yang mengacu pada visualisasi 2D menunjukkan bahwa pada daerah penelitian terlihat adanya pola-pola berwarna biru yang mengindikasikan sebagai zona *cavity* (rongga-rongga) yang diduga sebagai salah satu penyebab adanya potensi terjadinya amblesan tanah berupa luweng/*sinkhole*. Daerah yang diprediksi sebagai zona rawan amblesan tanah adalah daerah pengambilan data 5, 6 dan 7 yang berada disebelah selatan *sinkhole*/luweng, tepatnya pada area survei 2.

ABSTRACT

Anggun Shofiana. 2016. **Identification of Underground Cave on Limestone structure Based On the Data Interpretation of Ground Penetrating Radar (GPR) (Case Study in the village of Sumbermanjing Kulon, Pagak, Malang, East Java Province)**. Thesis. Physics Department, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University of Malang. Advisor: (1) Irjan, M.si (II) Ahmad Abtokhi, M.pd

Key Word: Limestone Structure, Underground Cave, Land Subsidence, Ground Penetrating Radar Future series 2005

In the area of Sumbermanjing Kulon district of Pagak of Malang had been found many land subsidence in the form of sinkhole/luweng that was very harmful for the local community, therefore conducted a survey Ground Penetrating Radar (GPR) Future Series 2005, to identify the underground cave and determine map of land subsidence zone in the limestone structure, Data was collected on the area around the cave and the area around the sinkhole/luweng. Total research area approximately were 43 x 22.5 meters. The data processing was done with the 3D visualizer software that was bundled with GPR Future Series 2005. Based on the results of qualitative interpretation which referred to the 2D visualization showed that the area of research there were many blue colored patterns that indicated a subsurface cavities (cavity zones) which were suspected as one cause of the potential occurrence of land subsidence in the form luweng/sinkhole. The area was predicted as a prone zone of subsidence of land or areas of incidence of catastrophic of new sinkhole/luweng was the area of data collection (trajectory) 5, 6 and 7 were located on the southern sinkhole/luweng, precisely in the survey area of 2.

مستخلص البحث

آغكون صفيان. 2016. تحديد الكهف تحت الارض فى هيكل الحجر الجيري بناء على تفسير البيانات من رادار الباطن الأرض *Ground Penetrating Radar (GPR)* دراسة حالة في قرية سمبيرمنجنيج كولون، فاكاك، مالانج جاوة الشرقية. بحث جامعي. شعبة الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا جامعة الإسلامية الحكومية مولانا مالك إبراهيم مالانج. المشرف: إرجان، الماجستير و احمد ابطخي، الماجستير

كلمات الرئيسية: هيكل الحجر الجيري، الكهف تحت الارض، هبوط الأرض، الرادار باطن الأرض (GPR) سلسلة المستقبل 2005

و في قرية سمبيرمنجنيج كولون، فاكاك، مالانج هي كثير العديد هبوط الأرض في شكل المجري او لوينج ضارة جدا للمجتمع المحلي وبالتالي إجراء الرادار الأرضي مسح اختراق (GPR) السلسلة المستقبلية 2005 لتحديد الكهوف تحت سطح والمناطق المعرضة للهبوط الأرض في هيكل من الحجر الجيري ، يتم جمع البيانات على المناطق الداخلية حول الكهف ومحيط المجري او لوينج. المساحة الكلية للبحث حوالي 43 مترا اكس 22.5 امتار. ويتم معالجة البيانات مع برنامج متخيل ثلاثي الابعاد التي يتم واحدة مع GPR السلسلة المستقبلية 2005. وبناء على نتائج التفسير النوعي الذي يشير إلى التصور ثنائي الأبعاد يدل على أن مجال البحث النظرات العديد من الأنماط الملونة الزرقاء التي تشير إلى وجود تجاويف تحت سطح الأرض (تجاويف) كسبب واحدة من احتمال حدوث هبوط الأرض في شكل المجري او لوينج ويتوقع المنطقة كم منطقة معرضة للهبوط من الأراضي هو مجال جمع البيانات (مسار) 5 و 6 و 7 وتقع على الجنوبي المجري او لوينج ، وتحديدًا في منطقة الدراسة 2.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Negara Indonesia terletak pada daerah khatulistiwa, membentang dari barat sampai ke timur, panjangnya tidak kurang dari 5000 Km, maka tidak salah jika Indonesia disebut sebagai negara yang besar, bukan saja karena jumlah penduduknya yang banyak atau luas tanah dan lautannya yang besar tapi potensinya untuk maju juga sangat besar.

Negara Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki potensi sumber daya yang beragam, termasuk di dalamnya berbagai jenis batuan, bahan galian, dan sumber daya energi padat, cair serta gas. Banyak diantaranya yang belum dikenal oleh khalayak umum apalagi dipahami secara baik dan mendalam, akan terlihat berbagai potensi yang dapat dikembangkan dan dimanfaatkan, baik dalam jangka pendek bahkan hingga jangka panjang.

Daerah kawasan karst merupakan daerah dengan bentang alam unik yang terjadi akibat adanya proses pelarutan pada batuan yang mudah terlarut (umumnya formasi batu gamping). Proses tersebut menghasilkan berbagai bentuk muka bumi 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 baik di Jawa Barat, Jawa Tengah, D.I Yogyakarta maupun Jawa Timur. Umumnya berkembang pada masa Oligosen – Miosen $\pm$ 30 – 10 juta tahun yang lampau. Karstifikasi dan gua berkembang sangat baik, terutama di sepanjang Pantai

Selatan. Di Jawa Timur daerah kawasan karst berkembang baik di Kabupaten Trenggalek, Kediri, Malang, Blitar, Tulungagung, dan Banyuwangi.

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

Dalam firman Allah dalam Surat An-Nahl ayat 15:

وَالْقَىٰ فِي الْأَرْضِ رَوَاسِيَ أَن تَمِيدَ بِكُمْ وَأَنْهَارًا وَسُبُلًا لَّعَلَّكُمْ تَهْتَدُونَ ﴿١٥﴾

"Dan Dia menancapkan gunung-gunung di bumi supaya bumi itu tidak goncang bersama kamu, (dan Dia menciptakan) sungai-sungai dan jalan-jalan agar kamu mendapat petunjuk" (QS. An-Nahl: 15).

Dalam ayat ini Allah menerangkan tanda-tanda kekuasaan-Nya yang dapat dilihat, diketahui, dirasakan dan dipikirkan oleh manusia, yaitu Allah menciptakan gunung-gunung yang dihiasi oleh aneka ragam tanaman dan tumbuh-tumbuhan yang menghihau serta dialiri sungai-sungai kecil yang mengalir bersatu menuju lautan luas. Pada ayat tersebut juga menganjurkan manusia untuk menjaga kelestarian alam, terutama kelestarian gunung-gunung seperti pegunungan kars

atau pegunungan gamping yang rawan akan kerusakan baik akibat ulah tangan-tangan manusia yang tidak bertanggung jawab maupun kerusakan akibat karstifikasi. Hal tersebut dikarenakan gunung-gunung merupakan kawasan yang menyimpan kekayaan alam yang penting bagi kehidupan manusia, yang mana ketika kekayaan alam tersebut dirusak akan mengakibatkan terjadinya bencana alam seperti banjir, tanah longsor, amblesan tanah dan lain-lain. Adapun kekayaan alam yang tersimpan pada kawasan gunung-gunung karst yaitu hutan, gua-gua bawah tanah, batuan gamping dan sumber air bersih.

Air merupakan salah satu aspek terpenting dalam kehidupan. Hal ini dikarenakan seluruh makhluk hidup membutuhkan air untuk mempertahankan hidup. Pada kenyataannya ketersediaan air semakin berkurang terutama pada musim kemarau. Banyak daerah di dunia khususnya Indonesia mengalami kekeringan dan kesulitan air, terutama daerah-daerah yang memiliki struktur geologi mayoritas karst, seperti daerah Pagak-Malang Selatan merupakan daerah yang memiliki formasi batuan penyusun yang terdiri dari batuan-batuan gamping atau karbonat. Sehingga warga masyarakat yang tinggal di daerah tersebut pada musim kemarau terpaksa harus mencari air dari sumber alami yang terdapat pada struktur karst yang disebut dengan Luweng atau mengambil air dari daerah yang bukan berstruktur geologi karst untuk memenuhi kebutuhan air sehari-hari.

Seperti yang telah diketahui dari struktur geologi wilayah karst memiliki sistem sungai bawah tanah (akuifer karst). Sistem akuifer karst memiliki sifat yang *anisotropis* dan heterogen (Ford and William, 1992). Artinya sistem sungai bawah tanah memiliki orientasi arah aliran tertentu dan melewati beragam struktur

batuan khas karst. Karakteristik geologi kawasan karst lainnya adalah terdapat porositas sekunder sebagai akibat dari retakan-retakan berbentuk lorong yang akan menjalar ke segala arah secara tidak beraturan (Adji, 2006). Sehingga akuifer karst diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu celah (*fissure*), rembesan (*diffuse*), dan lorong (*conduit*). Karst dengan sistem akuifer aliran *conduit* adalah pola paling sering dijumpai. Hal ini dikarenakan komponen aliran *conduit* pada saat hujan apabila dilihat hampir menyerupai sungai bawah tanah, dimana air hujan yang berada di permukaan masuk ke dalam akuifer karst melalui *sinkhole* (Adji, 2009).

Sinkhole merupakan cekungan-cekungan tertutup yang berada diantara kubah karst. Apabila *sinkhole* saling menyatu, maka akan terbentuk *uvala*. Di beberapa tempat, *sinkhole* dapat terisi air membentuk danau *sinkhole*. Kenampakan permukaan daerah karst selain *sinkhole* dan *uvala* adalah *polye* (gabungan dari *uvala*), *ponor*, menara karst (disebut pula *pinacle karst* atau *turm karst*), dan kubah karst. Keunikan lain dari daerah *karst* adalah keberadaan gua. Gua-gua karst hampir semuanya dihiasi dengan ornamen (*speleothem*) yang sangat beragam dari mulai yang sangat kecil (*helectite*) hingga yang sangat besar (*column*) dengan bentuk dan warna yang bervariasi. Gua-gua di bawah permukaan *karst* tersebut tidak hanya gua horisontal, namun ada juga gua vertikal yang cocok untuk para pecinta *caving*.

Jenis lorong pada gua dapat ditentukan dari segi Hidrologi. Lorong tersebut dibagi dalam 3 jenis, yaitu: *Lorong Fhareatik* dimana pada *Lorong Fhareatik* ini kondisi lorong masih sepenuhnya ditutupi oleh air dan pada umumnya memiliki dinding gua yang relatif halus. Pada kondisi lorong seperti ini

hanya bisa ditelusuri dengan teknik *Cave Diving*. *Lorong Vadose*, yaitu lorong yang sebagian dari lorong tersebut dialiri air. Pada *lorong Vadose* pembentukan ornament biasanya baru terbentuk pada bagian atap gua. *Lorong Fosile* yaitu lorong yang kering atau sudah tidak dialiri air lagi, kemungkinan adanya perubahan pola aliran air bawah permukaan. Pada lorong ini pembentukan ornament sudah mencapai nol.

Survei geofisika adalah survei awal yang bertujuan untuk memetakan geologi bawah permukaan berkenaan struktur geologi, stratigrafi, morfologi dan litologi batuan. Terdapat beberapa metode dalam survei geofisika diantaranya metode gravitasi (*gravity method*), metode GPR (*Ground Penetrating Radar*), metode magnetik (*magnetic method*), metode geolistrik resistivitas (*resistivity method*) dan potensial diri (*self potential method*). Metode yang digunakan pada penelitian ini, yakni untuk mengidentifikasi gua-gua bawah permukaan tanah pada struktur gamping adalah metode GPR (*Ground Penetrating Radar*).

Metode georadar adalah metode geofisika yang menggunakan prinsip-prinsip gelombang elektromagnetik (EM) untuk mengetahui struktur bawah permukaan dangkal dengan melihat kontras konduktivitasnya. Alat ini terdiri dari transmitter sebagai pemancar sinyal elektromagnetik ke dalam bumi dan receiver sebagai perekam sinyal. Gelombang pantul tersebut ditangkap oleh alat penerima secara digital dipermukaan bumi. Sehingga kita dapat memetakan struktur bawah permukaan bumi.

Teknologi radar ini mempunyai banyak kelebihan dibandingkan dengan metode yang lainnya, yaitu biaya operasional lebih murah, Multiguna, cara

pengoprasian dilapang juga lebih mudah, karena frekuensi yang digunakan sangat tinggi (MHz) maka resolusi yang diperoleh sangat tinggi.

Penerapan teknologi ini misalnya pendeteksian geologi bawah permukaan, sumber daya mineral, air tanah, lingkungan, keteknikan, arkeologi, bahaya geologi (mitigasi bencana), pendeteksian terowongan, forensik. (dari jurnal: Budiono, Kris. 2008. *Bunga Rampai*. PPPGL). Selain itu teknologi ini bisa digunakan untuk mendeteksi pipa-pipa, tangki, kabel yang tertanam dalam tanah, bahkan mampu menggambarkan lapisan-lapisan dalam tanah.

Metode ini dianggap sebagai metode yang paling prospektif, karena menghasilkan resolusi dan kecepatan akuisisi data tinggi dengan frekuensi tinggi untuk menyelidiki berbagai masalah kebumihan dan tidak bersifat merusak dan dikhususkan untuk eksplorasi dangkal (*near surface investigation*). Sehingga cocok untuk identifikasi gua bawah permukaan *karst* tanpa merusak struktur gua.

Penelitian terdahulu sebagai penunjang penelitian ini adalah penelitian mengenai penentuan karakteristik gua Seropan Gunung Kidul dengan metode *Ground Penetrating Radar* di daerah Yogyakarta (Ayi Syaeful Bahri, S.Si, M.T, 2009). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan karakteristik dinding gua tersebut. Data yang digunakan adalah data hasil rekaman *Ground Penetrating Radar (GPR)* pada tanggal 16-19 Agustus 2009. Untuk menggambarkan karakteristik dinding gua Seropan pada penelitian ini digunakan metode *Ground Penetrating Radar (GPR)* dengan *software* dan *hardware Future Series 2005*. Metode ini bekerja berdasarkan prinsip penjalaran gelombang elektromagnetik. Hasil dari metode ini berupa rekaman data yang menggambarkan karakteristik

dinding gua. Hasil ini selanjutnya dibandingkan dengan data lithologi gua. Hasil dari rekaman data *Ground Penetrating Radar (GPR)* menunjukkan bahwa beberapa zona gua tersebut mempunyai perbedaan karakteristik antara bagian dalam dengan bagian permukaan. *Zona massive limestone* yang direkomendasikan untuk tempat pemancangan pipa/anker sebagian besar berada di sebelah kiri gua.

Berdasarkan ulasan yang telah diterangkan di atas, maka bisa disimpulkan bahwa penelitian ini sangat penting untuk dilakukan karena sangat berhubungan dengan mitigasi dini bencana alam berupa amblesan tanah, *sinkhole* dan lain-lain yang sangat berbahaya bagi masyarakat daerah Pagak-Malang Selatan, tepatnya di Desa Sumbermanjing Kulon.



Gambar 1.1 Daerah Penelitian (a.) Gua, (b.) Luweng/Sinkhole

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana identifikasi gua-gua bawah tanah pada struktur gamping di daerah studi berdasarkan interpretasi data *GPR (Ground Penetrating Radar) Future Series 2005*?
2. Bagaimana peta zona rawan amblesan tanah pada struktur gamping di daerah studi berdasarkan interpretasi data *GPR (Ground Penetrating Radar) Future Series 2005* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah:

1. Untuk mengidentifikasi gua-gua bawah tanah pada struktur gamping di daerah studi berdasarkan interpretasi data *GPR (Ground Penetrating Radar) Future Series 2005*.
2. Untuk mengetahui peta zona rawan amblesan tanah pada struktur gamping di daerah studi berdasarkan interpretasi data *GPR (Ground Penetrating Radar) Future Series 2005*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dan urgensi penelitian ini adalah:

1. Dapat memberikan informasi mengenai gua-gua bawah tanah pada struktur gamping di daerah Pagak Kabupaten Malang tepatnya di Desa Sumbermanjing Kulon.
2. Mitigasi dini bencana alam amblesan tanah berupa luweng/*sinkhole*.

3. Bahan pertimbangan dan penunjang untuk pengembangan penelitian akademisi dalam bidang geofisika, geologi dan geoteknik selanjutnya serta pihak lain yang membutuhkan terkait penelitian ini.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini difokuskan hanya pada gua dan *Sinkhole*/Luweng di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur. Cakupan area penelitian (43m x 22,5m) terletak pada koordinat 8°18'21,67"- 8°18'23,28" LS dan 112°28'39,54"- 112°28'42,04" BT. Metode geofisika yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Ground Penetrating Radar (GPR) Future Series* 2005 dengan memanfaatkan sifat elektromagnetik berupa travel time dari gelombang radio yang memiliki rentang frekuensi 25-1000 MHz.

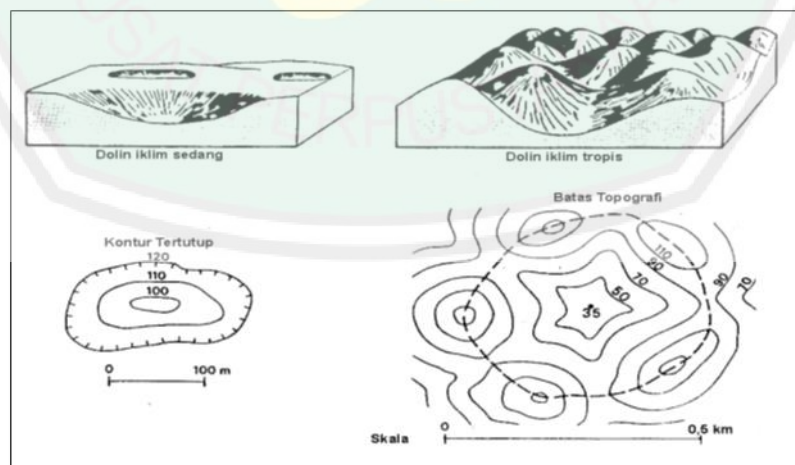
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kawasan Karst dan Karakteristiknya

Karst merupakan medan dengan batuan gamping 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 (Summerfield, 1991 dalam Sutikno dan Eko Haryono, (2000: 2). Tjahayo Nugroho Adji dkk (1999: 1) 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 (2007: 1) 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: 1). Selanjutnya menurut Eko Haryono (2004: 1) karst dicirikan oleh: (1) terdapatnya cekungan tertutup dan atau lembah kering dalam berbagai ukuran dan bentuk, (2) langkanya atau tidak terdapatnya *drainase*/sungai permukaan, dan (3) terdapatnya goa dari sistem *drainase* bawah tanah.

Proses pembentukan bentuklahan 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: 1). Di daerah tropis perkembangan karst lebih intensif seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Perbandingan perkembangan dolin pada daerah iklim tropis dan iklim sedang (Ford dan Williams, 2007: 341 dalam Eko Haryono, 2004)

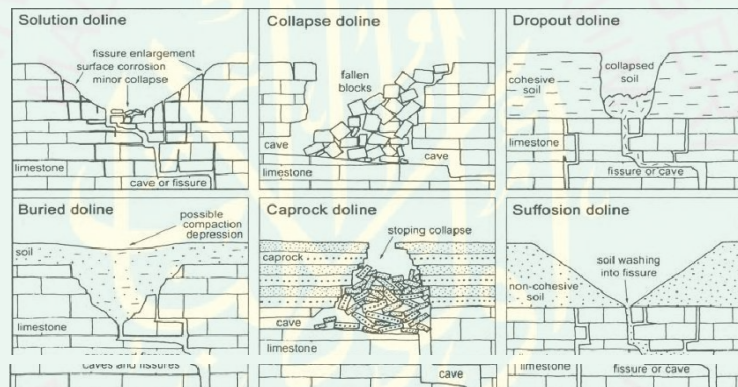
Nilai kelangkaan kawasan karst terkait dengan waktu pembentukannya yang memakan waktu lama. Pembentukan kawasan karst utamanya oleh proses pelarutan dapat mengakibatkan degradasi. Kecepatan degradasi pada kawasan karst sangat lambat. Variasi tingkat degradasi tersebut tergantung pada suhu udara dan curah hujan tahunan (Eko Haryono dan Sutikno dalam Eko Haryono: 2004: 110).

Sweeting dalam Eko Haryono (2004: 5) 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 kedalam jenis yang terakhir ini (Eko Haryono, 2004: 3).

Tipe karst lainnya adalah *Labyrint* 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 yang merupakan karst yang terbentuk pada masa geologi lampau dan saat ini proses karstifikasinya sudah berhenti (Sweeting, 1972 dalam Eko Haryono, 2004: 6). Beberapa hal penting dalam pembahasan mengenai geomorfologi karst antara lain Dolin, Uvala, Polje, dan morfologi mikro.

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: 339 dalam Nuraini, 2012). Dolin menurut (Ford dan Williams (2007: 341) dalam Nuraini, 2012) dibedakan menjadi enam yaitu *solution doline*, *collapse doline*, *dropout doline*, *buried doline*, *caprockdoline*, dan *suffosion doline* (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Berbagai tipe dolin berdasarkan genetis (Ford dan Williams, 2007 dalam Nuraini, 2012)

Tipe dolin juga dikelompokkan menjadi tiga tipe, yaitu:

1. Dolin berbentuk mangkuk, rasio diameter dan kedalaman 1:10 dengan kemiringan lereng berkisar antara 100 sampai 200, dasar doline umumnya terisi oleh tanah.
2. 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.

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

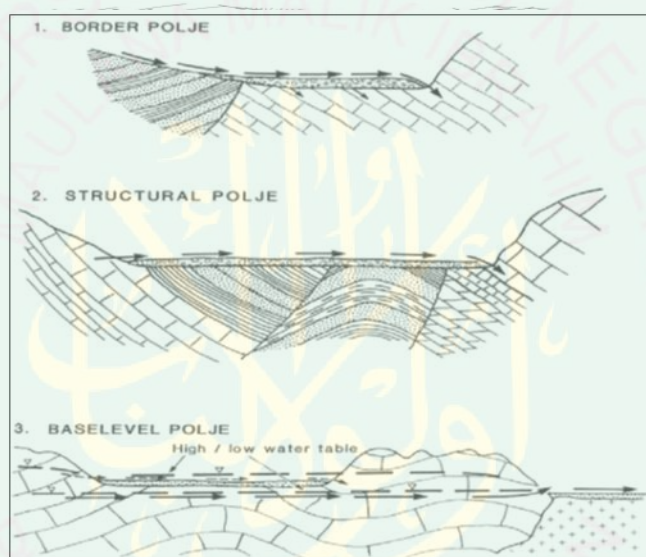
Setiap dolin atau cekungan tertutup tersusun oleh tiga komponen (White, 1988 dalam Eko Haryono, 2004: 15) yaitu: (1) pengatus, yaitu saluran ponor dengan permeabilitas tinggi yang mengataskan air dalam doline ke sistem *drainase* bawah tanah, (2) mintakat yang berubah oleh proses pelarutan di permukaan dan dekat permukaan batuan, (3) 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 bentuklahan 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: 13).

Polje mempunyai karakteristik minimal sebagai berikut (Ford dan Williams, 2007: 362 dalam Nuraini, 2012): (1) dasar yang rata dapat berupa batuan dasar (dapat berteras) maupun tertutup sedimen lepas atau aluvium, (2) cekungan tertutup yang dibatasi oleh perbukitan dengan lereng terjal pada dua sisi atau salah satu sisinya, (3) mempunyai drainase karstik, (4) dasar yang rata mempunyai lebar minimum 400 meter. Menurut (Ford dan Williams (2007: 363-

364) dalam Nuraini, 2012) polje dibedakan menjadi tiga yaitu (1) polje perbatasan (*border*) yang terbentuk apabila sistem hidrologi didominasi oleh masukan air alogenik (dari luar sistem karst), (2) polje struktural yang terbentuk karena pengaruh struktur (graben dan atau sesar miring) dengan batuan impermeabel di dalamnya, dan (3) polje *base level* yang terbentuk regional muka air tanah memotong permukaan tanah. Berbagai tipe polje ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Berbagai tipe polje (Ford dan Williams, 2007: 364 dalam Nuraini, 2012)

3. Bukit Karst

Bukit karst yang 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 batu gamping (Eko Haryono, 2004: 4).

4. Gua

Menurut (Mylroie dan Carew, (1995: 6-10) dalam Nuraini, 2012), gua dapat diklasifikasikan berdasarkan proses terbentuknya menjadi tiga, yaitu:

1. *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*.
2. *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 airtanah dan tenaga air laut. *Banana hole* terbentuk akibat adanya tenaga pelarutan yang bekerja secara horizontal akibat aliran airtanah.
3. *Fracture caves*, gua yang terbentuk akibat sesar atau patahan pada zona patahan dan berkembang baik secara vertikal maupun horizontal.

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 (Thornbury (1964: 337-339) dalam Nuraini, 2012) lembah karst diklasifikasikan menjadi empat, yaitu:

1. *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.
2. *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 diatas batuan gamping saat melewati lubang air akan masuk dan sungai menjadi hilang secara permanen.

3. Lembah kering atau *dry valley* merupakan lembah besar yang terbentuk akibat runtuhnya permukaan dikarenakan sungai bawah tanah yang sudah tidak dialliri air sehingga tidak mampu menahan beban material diatasnya.
4. Lembah saku (*pocket valley*) merupakan Lembah yang berhubungan dengan pemunculan air yang besar biasanya berbatasan dengan tebing bertingkat dan curam pada bagian atas. kebalikan dari *blindvalley*, 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 (Jankowski, 2001 dalam Tjahyo Nugroho Adji, 2004: 18). Di kawasan karst, cekungan bawah permukaan dapat diidentifikasi dengan mencari hubungan antara sungai yang tertelan (*swallow holes*) dan mataair. Cekungan bawah permukaan ini dapat berkorelasi dengan cekungan aliran permukaan (DAS) jika jalur lorong-lorong solusional pada bawah permukaan utamanya bersumber pada sungai permukaan yang masuk melalui ponor (Tjahyo Nugroho Adji, 2004: 19).

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: 19). 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. Gillison (1966) dalam Tjahyo Nugroho Adji (2004: 19) menyebutkan terdapat lagi satu sistem drainase di daerah karst yaitu sistem rekahan (*fissure*).

Sifat agihan vertikal akuifer pada batuan karbonat cenderung berubah dari waktu ke waktu tergantung dari cepat lambatnya tingkat pelarutan dan lorong-lorong yang terbentuk. Akuifer karst memiliki porositas sekunder yaitu porositas yang lebih tergantung pada proses sekunder seperti adanya rekahan atau lorong hasil proses solusional. Sedangkan porositas primer terbentuk dari matriks batuan itu sendiri. Dalam hal porositas sekunder, batuan gamping dan juga dolomit yang belum terkarstifikasi mempunyai kisaran nilai porositas yang sangat kecil (maksimal 10%), sebaliknya jika batuan gamping telah terkarstifikasi akan mempunyai nilai porositas yang tinggi (mencapai 50%). Nilai konduktivitas hidraulik atau permeabilitas di kawasan karst juga relatif tinggi. Permeabilitas adalah kemampuan suatu batuan untuk meloloskan air. Nilai permeabilitas tergantung dari porositas, sortasi batuan, maupun tekstur batuan. Karena adanya lorong-lorong solusional yang dihasilkan maka nilai permeabilitas menjadi cukup signifikan dibandingkan dengan jenis batuan lain (Tjahyo Nugroho Adji, 2004: 19).

2.2 Akuifer

Akuifer merupakan lapisan batuan yang dapat menyimpan dan mengalirkan air. Beberapa jenis batuan dapat berfungsi sebagai akuifer. Akuifer yang umum dijumpai di lapangan adalah endapan pasir, kerikil, kerakal dan bernagkal yang belum terlitifikasi lanjut. Selain itu, yang cukup baik berfungsi sebagai akuifer adalah batu pasir, juga batu gamping. Batuan sedimen yang lain misalnya serpih (shale), batu gamping pejal tak berongga bukan merupakan akuifer yang baik. Kemampuan akuifer untuk menyimpan dan mengalirkan air dipengaruhi oleh porositas dan permeabilitas (Mandel, 1981 dalam Widada, 2007).

Porositas merupakan persentase dari pori-pori batuan yang dapat terisi oleh fluida. Porositas secara tidak langsung berhubungan dengan konduktivitas hidrolik. Akuifer dengan porositas yang tinggi akan memiliki nilai konduktivitas hidrolik yang tinggi pula. Porositas dapat terbentuk secara primer dan sekunder. Proses pembentukan porositas primer terjadi selama proses pengendapan berlangsung (*syngenetic*), yaitu terbentuknya ruang antar butiran komponen penyusun batuan sedimen. Sedangkan porositas sekunder terbentuk setelah litifikasi (*postgenetic*), baik melalui pelarutan (contoh: batu gamping) dan atau pengkekaratan (*joint*) akibat tekanan-tekanan oleh gejala tektonik). Oleh karena itu, baik batuan beku maupun metamorf, sepanjang memiliki porositas yang tinggi (baik primer maupun sekunder) akan mampu berfungsi sebagai akuifer (Mandel, 1981 dalam Widada, 2007).

Hal penting lainnya yang menunjang sifat kelulusan air dari akuifera adalah permeabilitas. Permeabilitas adalah kemampuan batuan untuk mengalirkan air. Untuk itu diperlukan syarat adanya pori-pori yang saling berhubungan (*interconnected pores*) (Mandel, 1981 dalam Widada, 2007).

Berdasarkan sifat fisik batuan, secara garis besar ada 2 jenis media penyusun akuifer, yaitu sistem media pori dan sistem media rekahan. Kedua sistem ini memiliki karakter air tanah yang berbeda satu sama lain. Pada sistem media berpori, air tanah mengalir melalui rongga antar butir yang terdapat dalam suatu batuan misalnya batu pasir dan batuan aluvial. Pada sistem media rekahan, air mengalir melalui rekahan-rekahan yang terdapat pada batuan yang terkena tektonik kuat, pada batu gamping, batuan metamorf, dan lava. Rekahan terjadi selain akibat proses tektonik, juga akibat proses pelarutan pada batu gamping (Mandel, 1981 dalam Widada, 2007).

Pembagian sistem akuifer dan air tanah di alam menurut Santosa dan Adji, 2004, yaitu:

1. Akuifer tertekan (*Confined Aquifer*) merupakan suatu jenis akuifer yang bagian atas dan bawahnya dibatasi oleh lapisan bersifat kedap air akifug atau akiklud.
2. Akuifer bebas (*Unconfined Aquifer*) merupakan suatu jenis akuifer yang dibatasi oleh 1 lapisan impermeabel di bagian bawahnya dan pada bagian atasnya tidak ada lapisan penutup/*impermeable layer*.

3. Akuifersemi (*Semi-confined Aquifer*) merupakan suatu jenis akuifer yang dibatasi oleh lapisan semi permeabel/lapisan akitard (di atas dan atau di bawahnya).
4. Akuifer melayang (*Perched Aquifer*) merupakan suatu jenis akuifer berupa bentuk lensa-lensa batuan yang dibatasi oleh lapisan *impermeable* (di atas dan di bawahnya).

2.3 Potensi dan Karakteristik Kawasan Karst

Berdasarkan kamus besar Bahasa Indonesia potensi merupakan kemampuan yang mempunyai kemungkinan untuk dikembangkan yang meliputi kekuatan, kesanggupan, dan daya. Karakteristik merupakan ciri-ciri yang dimiliki sehingga berbeda dengan yang lain. Potensi kawasan karst merupakan nilai manfaat kawasan dari ekosistem kawasan karst meliputi sumberdaya alam dan lingkungan yang meliputi ilmu pengetahuan, obyek lingkungan, kondisi sosial budaya masyarakat, habitat flora dan fauna yang spesifik (Suratman Worosuprojo dalam Eko Haryono, 2004: 88).

Karakteristik kawasan karst merupakan ciri-ciri morfologi akibat pengaruh karstifikasi dan bentuk lahannya, sehingga memiliki ciri-ciri yang berbeda dengan daerah lainnya atau memiliki variasi kenampakan karst (Suratman Worosuprojo dalam Eko Haryono, 2004: 89). Karakteristik kawasan karst memiliki pengaruh terhadap potensi kawasan karst yang ada, meliputi kenampakan eksokarst dan endokarst dan berpengaruh terhadap sumberdaya alam yang ada.

Fungsi dari kawasan karst menurut Heddy S. Mukna (2009) adalah sebagai berikut:

1. Habitat aneka spesies flora dan fauna yang memiliki nilai endemik tinggi karena kawasan karst merupakan ekosistem yang unik, sehingga memperkaya khasanah keanekaragaman hayati.
2. Fungsi hidrologi atau tata air. Permukaan kawasan karst berfungsi sebagai tandon penampung air yang besar untuk suplai air ke seluruh kawasan tersebut.
3. Fungsi wisata. Kawasan karst memiliki kondisi fisiografi atau bentang alam yang unik dan langka.
4. Fungsi pelestarian sejarah (situs arkeologi). Sering ditemukannya fosil manusia di kawasan karst seperti di dinding-dinding gua.
5. Fungsi penelitian. Lingkungan biotik dan abiotik kawasan karst merupakan situs penting bagi pengembangan pengetahuan, baik yang berbasis ilmu kebumihan (geologi, geomorfologi, paleontologi), ekologi, biologi, kehutanan, pertanian, peternakan, maupun sosial dan budaya.

2.4 Pengolahan dan Pelestarian Kawasan Karst

Fungsi kawasan karst secara garis besar dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu: fungsi ekologis, hidrologis, dan sosial-ekonomi. Ketiga fungsi tersebut perlu dilindungi melalui pengelolaan yang berwawasan lingkungan dan berwawasan kedepan. Tidak semua kawasan karst mempunyai ketiga-tiga fungsi sama kuatnya, oleh sebab itu perlu kriteria penataan kawasan karst yang perlu dilindungi dan kawasan karst yang dapat dimanfaatkan untuk kegiatan sosial-ekonomi. Kriteria kawasan karst yang perlu dilindungi fungsinya antara lain sebagai berikut (Sutikno dan Eko Haryono, 2000: 4):

1. Mempunyai nilai alami, sosial-ekonomi dan kultural tinggi,
2. Mempunyai karakteristik kenampakan karst yang lengkap dalam satu situs,
3. Tingkat degradasi lingkungan rendah,
4. Mempunyai nilai kelangkaan tinggi.

Strategi pengelolaan sumberdaya alam kawasan karst ditujukan untuk mencapai fungsi saintifik, ekonomi dan sosial budaya harus memperhatikan empat aspek, yaitu (Sutikno, 2001: 8):

1. Perubahan, yang mencakup perubahan lingkungan, sosial, sistem ekonomi dan sistem politik.
2. Kompleksitas, kawasan karst mempunyai kompleksitas yang tinggi, sehingga dampak aktifitas manusia selalu kompleks dan tidak semua dapat diprediksi.
3. Ketidakpastian, lingkungan secara totalitas itu merupakan satu sistem, sehingga lingkungan penuh ketidakpastian dan dalam mengambil keputusan untuk mengelola sumberdaya alam harus hati-hati.
4. Konflik, dalam pengalokasian sumberdaya alam kebanyakan menimbulkan konflik, yang terefleksikan pada perbedaan pandangan, ideologi, dan harapan.

Pengelolaan sumberdaya alam pada kawasan karst harus didasari oleh asas dan strategi yang tepat. Pola yang perlu dianut dalam pengelolaan sumberdaya kawasan karst untuk tujuan ekonomi harus memperhatikan azas konservasi dan azas efisiensi antara lain adalah (Sutikno, 2001: 8):

1. Mengutamakan pengelolaan sumberdaya alam yang dapat diperbaharui.

2. Menghemat sumber alam yang langka.
3. Memelihara kemampuan sumberdaya alam untuk menopang pembangunan yang berazaskan keberlanjutan.
4. Mengembangkan rencana penggunaan dan tata ruang yang baik.
5. Merehabilitasi kerusakan sumberdaya alam yang telah terjadi.
6. Memberi nilai kelangkaan terhadap sumberdaya alam yang langka dan memberikan prioritas untuk penyelamatan dan perlindungan.

Pelestarian kawasan karst dilakukan dalam bentuk perlindungan fungsi kawasan karst diantaranya dengan inventarisasi/penelitian, penataan kawasan, rehabilitasi, dan pemberdayaan masyarakat penghuni karst (Sutikno dan Eko Haryono, 2000: 6-7).

1. Inventarisasi dan penelitian diharapkan mampu memberikan informasi karakteristik dan variasi karst di Indonesia.
2. Penataan ruang/kawasan dimaksudkan untuk mengalokasikan lahan di kawasan berbatuan karbonat sesuai dengan potensinya.
3. Rehabilitasi pada dasarnya mengembalikan siklus atau proses alam kembali atau mendekati keadaan semula atau alamiah.

2.5 Sungai Bawah Permukaan

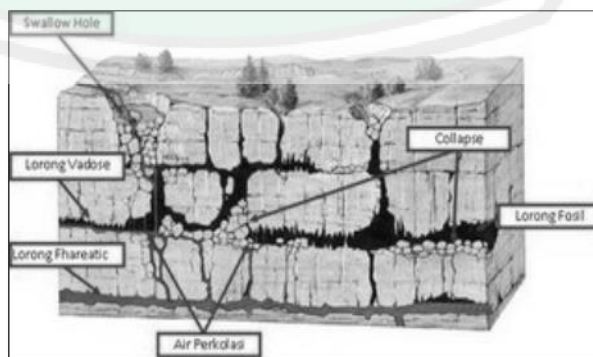
Sungai bawah permukaan merupakan salah satu karakteristik daerah karst. Sungai bawah permukaan juga mempunyai sistem aliran seperti yang terjadi pada sungai permukaan. Sampai saat ini sistem sungai yang paling lengkap, meskipun belum 100 % terbukti, adalah sistem sungai bawah tanah yang bermuara di Baron. Selain itu, masih ada sistem-sistem yang lain tetapi masih belum dapat

dipastikan, misalnya sistem Ngobaran, atau mungkin juga sistem Sundak (Eko, 2000 dalam Haerudin, 2007 dalam Astri, 2009). Sungai-sungai yang masuk ke dalam sistem sungai bawah tanah ditunjukkan oleh tabel berikut.

Tabel 2.1 Sungai yang Masuk ke Dalam Sistem Sungai Bawah Permukaan
Sumber: Mc Donald, 1983 dalam Haerudin, 2007 dalam Astri, 2009

No	Nama Sungai	Tempat Masuk	Debit(lt/dt)
1.	Kali Tegoan	Gua Sumurup	230-260
2.	Kali Suci	Gua Suci	160
3.	Kali Serpeng	Gua Serpeng	4
4.	Kali Petoeng	Gua Jomblang	400

Di kawasan karst banyak dijumpai guadan *sungai bawah permukaan* yang juga menjadi pemasok ketersediaan air tanah yang sangat dibutuhkan oleh kawasan yang berada di bawahnya dan dalam perkembangannya sungai bawah permukaan juga dapat digunakan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro.



Gambar 2.4 Titik Asal Aliran Sungai Bawah Permukaan (Bahri, 2009)

Pada fenomena bawah permukaan sering kali kita jumpai adanya aliran sungai bawah permukaan yang mengalir seperti halnya sungai-sungai yang ada di permukaan bumi. Aliran sungai tersebut bisa berasal dari luar gua dimana air permukaan yang berada di luar gua masuk kedalam *Swallow Hole* (Mulut Telan) dan muncul lagi ditempat yang lain bahkan biasanya sangat jauh dari lokasi *Swallow Hole*. Tempat keluarnya aliran sungai bawah permukaan di kawasan Karst disebut *Resurgence* atau Karst Spring. Jika kita interpretasi melalui Peta Topographi terlihat aliran sungai yang mengalir lalu menghilang/terputus. Aliran tersebut biasa disebut *Vadose Stream*/arus Vadose/Sungai Vadose atau disebut juga aliran *Allochthonous*. Aliran pada sungai bawah permukaan juga bisa berasal dari gua itu sendiri dimana air yang berada di permukaan Kawasan Karst meresap masuk kedalam Kawasan Karst dan ketika didalam gua menjadi ribuan tetesan yang kemudian tertampung lalu mengalir dan membentuk sebuah aliran sungai. Aliran tersebut biasa disebut *Percolation Water* atau disebut juga aliran *Autochthonous* (Bahri, 2009).

Pada umumnya air yang mengalir didalam gua terdiri dari campuran air Vadose dan Perkolasi. Air Perkolasi dan air Vadose memiliki perbedaan dari segi kuantitas maupun kualitas. Air Perkolasi pada umumnya banyak mengandung CaCO_3 karena air Perkolasi meresap dan merembes secara perlahan ke dalam gua sehingga mineral pada batu gamping yang didominasi oleh Calsite (CaCO_3) lebih banyak terbawa. Sedangkan aliran Vadose sangat sedikit mengandung Calsite karena bentuk aliran yang hanya melewati sungai bawah permukaan sehingga sangat singkat bersinggungan dengan mineral batu gamping. Air Perkolasi juga

dapat dilihat dari fluktuasi suhu yang konstan sepanjang hari bahkan sepanjang tahun, sedangkan air Vadose berfluktuasi dengan suhu diluar gua. Air Vadose juga pada umumnya keruh karena material yang berasal dari luar gua ikut hanyut kedalam alirannya seperti lumpur, pasir dan kerikil. Sedangkan pada aliran Perkolasi cukup jernih karena proses perembesan tadi sehingga air tersebut tersaring pada pori-pori batu gamping (*limestone*). Pada saat turun hujan, gua yang dialiri oleh air Vadose akan lebih cepat bertambah debitnya dan ketika hujan berhenti serentak debit airnya juga menurun sampai level air sebelum hujan. Berbeda dengan air Perkolasi, ketika diluar gua terjadi hujan lebat, debit air bertambah secara perlahan-lahan tidak secepat aliran Vadose dan ketika hujan berhenti debit air juga akan turun secara perlahan-lahan (Bahri, 2009).

Air Perkolasi juga membantu dalam proses pembentukan ornamen gua, karena mineral yang dibawa oleh tetesan atau rembesan Air Perkolasi tidak semuanya ikut larut didalam air akan tetapi sebagian mampir dan mengendap pada atap, dinding atau lantai gua sehingga lama kelamaan akan terjadi sedimentasi mineral, maka terbentuklah ornament-ornament yang terdapat pada atap gua seperti: *Soda Straw*, *Stalagmite*, *Helektite*, *Deflected Stalagmite* dan berbagai ornament yang menggantung diatap gua. Di dinding gua terbentuk *Drapery*, *Canopy* dan dilantai terbentuk *Gourdam*, *Kalsit Floor*, *Rim Stone*, *Stalagmite* dan masih banyak lagi ornament lainnya yang terbentuk di plafon, dinding dan lantai gua yang sangat indah yang merupakan fenomena lingkungan gua yang tak dapat ditemukan di dunia luar (Bahri, 2009).

2.6 Teori Sinkhole

Sinkhole merupakan suatu objek yang terdapat dibawah permukaan. Terdapatnya *cavity* di bawah permukaan merepresentasikan terdapatnya anomali pada *subsurface*. Terdapat beberapa definisi mengenai *sinkhole* yang terdapat di bawah permukaan yaitu: Bahaya umum *Sinkhole* di batuan gamping karst, terkait dengan keruntuhan atau *subsidence* yang sering berakhir siklus hidup dari bawah permukaan rongga (Klimchouk, 2005; Brinkmann et al., 2008; Frumkin et al., 2009; Parise et al., 2009). *Sinkhole* adalah manifestasi permukaan bawah permukaan pembubaran dan erosi internal dan deformasi, sering tersembunyi dari pengamatan langsung dan metode penelitian dari satelit yang paling sub-Aerial (Gutiérrez, 2009). Abelson et al. (2003) menyarankan bahwa *Sinkhole* cenderung berkembang sepanjang patahan, yang berfungsi sebagai jalur hidrolik preferensial, membawa air ke atas untuk terhubung dengan garam. Bahaya *Sinkhole* lebih sering dikaitkan dengan pembubaran permukaan garam (Ford dan Williams, 2007). Bahaya *Sinkhole* berkaitan dengan pembubaran permukaan garam dan runtuhnya lapisan atas yang begitu besar (Frumkli et al., 2011 dalam Paulus, 2012). *Sinkhole* merupakan fenomena alam yang dapat terjadi pada geologi sedimen dangkal di berbagai daerah di dunia (Al-Zoubi et al., 2007). *Sinkhole* adalah depresi di permukaan tanah yang disebabkan oleh air bergerak ke bawah ke dalam celah-celah dan bagian dalam batu kapur di bawah ini (Neawsupard dan Soisa). *Sinkhole*-berbagai permukaan depresi, 1-1000 meter, yang berhubungan dengan batu yang mendasari rongga (Waltham et al, 2005). *Sinkhole* adalah salah satu indikasi paling terlihat dari ketidakstabilan batuan dasar dalam pembentukan Karst (Sinclair, 1982: Tharp, 1999: Waltham et al, 2005: Gunay et al., 2011 dalam

Paulus, 2012). *Sinkhole* dapat diinduksi melalui salah satu penyebab alami atau aktivitas manusia, *Sinkhole* yang terjadi secara alami biasanya dibentuk oleh pembubaran lambat, ke bawah batuan karbonat atau melalui runtuhnya batuan dasar di daerah-daerah yang berada dipermukaan gua (Langer, 2001 dalam Paulus, 2012).

Teori-teori pembentukan *Cavity/Sinkhole* dapat dikelompokkan pada sedikitnya 3 teori utama (di antaranya mengikuti Ford dan Williams, 1996 dalam Astri, 2009) yakni Teori Vados Dwerry House (1907), Greene (1908), Matson (1909), dan Malott (1937). Teori ini menginformasikan bahwa sebagian besar perkembangan gua berada di atas muka airtanah, zona vados. Zona vados merupakan zona aliran airtanah yang paling intensif. Hal ini dikarenakan aliran airtanah mengalir di zona ini dengan cepat sehingga terjadi proses erosi dan korosi mekanis sekaligus terjadi proses pelarutan karbonat. Teori Freatis dalam Cjivic (1893), Grund (1903), Davis (1930) dan Bretz (1942). Dalam teori ini dijelaskan bahwa pembentukan awal gua dan pada umumnya perkembangan gua terjadi di kedalaman yang acak di bawah muka airtanah. Perkembangan gua yang semakin besar terjadi karena korosi oleh airtanah yang mengalir pelan. Perkembangan gua tahap kedua terjadi apabila muka airtanahnya menjadi turun lebih rendah. Akibatnya terjadi pengeringan gua dan membuatnya menjadi berada pada zona vados. Teori Freatis Dangkal atau Teori Muka Airtanah Swinnerton (1932), R. Rhoades dan Sinacori (1941), dan Davies (1960). Teori ini menjelaskan bahwa aliran airtanah yang mengalir deras pada muka airtanah akan menyebabkan proses pelarutan yang semakin intensif di banyak gua. Dari teori ini maka dapat

diasumsikan bahwa apabila posisi muka airtanah berubah maka posisi pembentukan gua juga ikut berpindah mengikuti muka airtanah. Sehingga untuk menjaga kondisi tersebut, posisi rata-rata muka airtanah harus relatif tetap konstan untuk periode yang lama. Sehingga kesimpulannya adalah dalam teori ini menjelaskan bahwa sistem gua bertahap. Tahapan ini merupakan akibat dari perubahan arus dasar (*base level*) yang diikuti tahap rejuvenasi (peremajaan).

2.7 Gelombang Elektromagnetik

Hal yang paling mendasar dalam penelitian ini adalah masalah gelombang. 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).

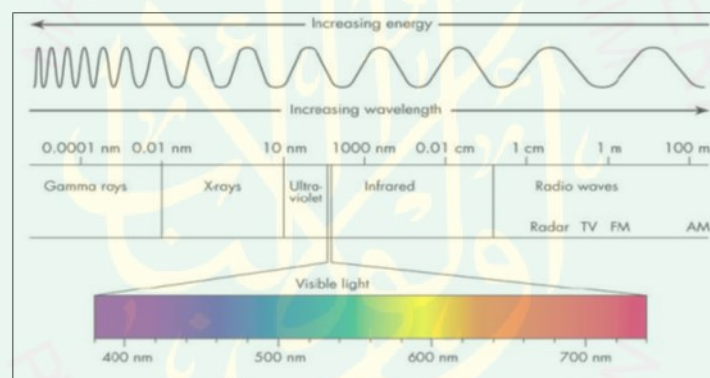
Alloh SWT berfirman dalam Surat Ar-Rum ayat 46:

وَمِنْ ءَايَاتِهِ أَنْ يُرْسِلَ الرِّيَّاحَ مُبَشِّرَاتٍ وَلِيُذِيقَكُمْ مِنْ رَحْمَتِهِ وَلِتَجْرِيَ
الْفُلُكُ بِأَمْرِهِ وَلِتَبْتَغُوا مِنْ فَضْلِهِ ۚ وَلَعَلَّكُمْ تَشْكُرُونَ ﴿٤٦﴾

“Dan di antara tanda-tanda kekuasaan-Nya adalah bahwa Dia mengirimkan angin sebagai pembawa berita gembira dan untuk merasakan kepadamu sebagian dari rahmat-Nya dan supaya kapal dapat berlayar dengan perintah-Nya dan (juga)

supaya kamu dapat mencari karunia-Nya; mudah-mudahan kamu bersyukur” (QS. Ar-Rum: 46).

Secara umum “angin” disini sebagai angin yang bertiup membawa awan untuk menurunkan air hujan dan angin yang meniup kapal layar agar dapat berlayar dilautan. Kita merasakan kedekatan makna “angin” dalam ayat ini adalah gelombang, bukan saja gelombang bunyi yang membawa berita tetapi juga gelombang radio atau gelombang elektromagnet yang mampu dipancarkan kesegala penjuru dunia bahkan seluruh jagad raya ini.



Gambar 2.5 Spektrum Gelombang Elektromagnetik (Muhyi dalam Bahri, 2009)

Gelombang elektromagnet 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):

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

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

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

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

Dimana:

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

ρ = tahanan jenis ($\Omega \cdot \text{m}$)

$\mathbf{B}$ = medan magnet (tesla)

$\mathbf{E}$ = medan listrik (N/C)

μ = permeabilitas magnetik

$\mathbf{J}$ = 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 perlapisan-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 koefisiensi 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 relatif (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):

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

Dimana:

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

ϵ_r = Konstanta dielektrik relatif

μ_r = Permeabilitas magnetik relatif

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

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

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m/ns} \quad (2.7)$$

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

Tabel 2.2 Kecepatan dan Konstanta Dielektrik Berbagai Medium
Sumber: Astutik, 1997

Medium	ϵ_r	Kecepatan [m/ μs]
Air	1	300
Fresh Water	81	33
Limestone	7-16	75-113
Granite	5-7	113-134
Schist	5-15	77-134
Concrete	4-10	95-150
Clay	4-16	74-150
Silt	9-23	63-100
Sand	4-30	55-150

<i>Moraine</i>	9-25	60-100
<i>Ice</i>	3-4	150-173
<i>Permafrost</i>	4-8	106-150

2.8 Ground Penetrating Radar (GPR)

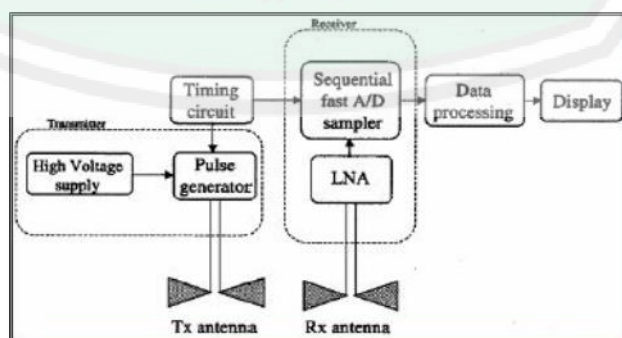
2.8.1 Radar

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):

1. Lereng permukaan secara makro (topografi) menyebabkan perbedaan rona karena perbedaan arah menghadap ke sensor.
2. Kekasaran permukaan yang menyebabkan perbedaan pantulan pulsa radar.
3. Perbedaan kompleks.

2.8.2 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 harfiahnya 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 metoda 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 outputnya (Ligthart, 2004 dalam Bahri, 2009).



Gambar 2.6 Sistem GPR (Ligthart dalam Bahri, 2009)

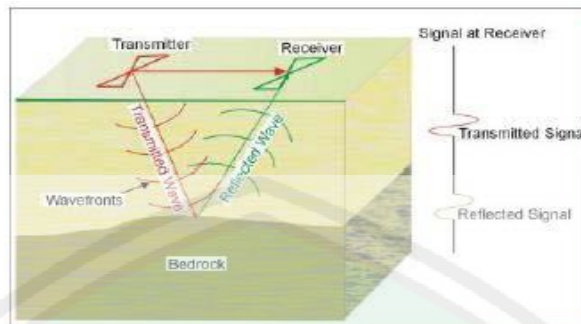
Berdasarkan blok diagram tersebut masing-masing blok mempunyai fungsi yang cukup penting dan saling ketergantungan. Hal ini dikarenakan GPR merupakan suatu sistem mulai dari penghasilan pulsa pada pulse generator lalu melewati blok-blok yang ada kemudian sampai pada blok *display* dimana kita dapat melihat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

1. Jenis objek yang akan dideteksi.
2. Kedalaman objek.
3. Karakteristik elektrik medium tanah atau properti elektrik.

Dari proses pendeteksian seperti di atas, maka akan didapatkan suatu citra dari letak dan bentuk objek yang terletak di bawah tanah atau dipermukaan tanah. Untuk menghasilkan pendeteksian yang baik, suatu sistem GPR harus memenuhi empat persyaratan sebagai berikut (Daniel, 1996 dalam Bahri, 2009):

1. Kopling radiasi yang efisien ke dalam tanah.
2. Penetrasi gelombang elektromagnetik yang efisien.
3. Menghasilkan sinyal dengan amplitudo yang besar dari objek yang dideteksi.
4. *Bandwidth* yang cukup untuk menghasilkan resolusi yang baik.

2.8.3 Prinsip Kerja GPR



Gambar 2.7 Konsep Akuisisi Data (Astutik dalam Bahri, 2009)

Pada dasarnya GPR bekerja dengan memanfaatkan pemantulan sinyal. Semua sistem GPR pasti memiliki rangkaian pemancar (*transmitter*), yaitu sistem antenna yang terhubung ke sumber pulsa, dan rangkaian penerima (*receiver*), yaitu sistem antenna 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 antenna 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):

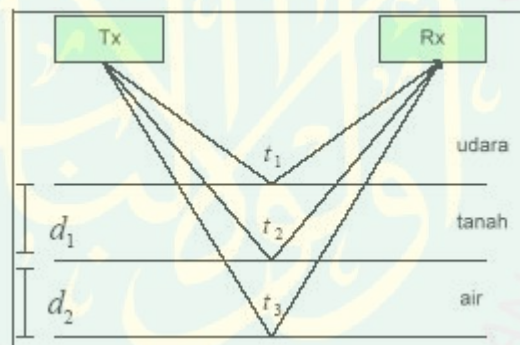
$$h = \frac{1}{2}tv \quad (2.8)$$

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:

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.9)$$

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

$$d_1 = \frac{(t_2 - t_1)C}{2\sqrt{\epsilon_{r1}}} \text{ dan } d_2 = \frac{(t_3 - t_2)C}{2\sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.10)$$



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):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0}} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.11)$$

Dimana:

δ = *skin depth* (meter)

ρ = resistivitas ($\Omega.m$)

f = frekuensi (Hz)

μ_r = permeabilitas relatif (H/m)

μ_0 = permeabilitas magnet di udara/ruang vakum = $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

Kemampuan penetrasi GPR tergantung pada frekuensi sinyal, efisiensi radiasi antenna 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 (Arcone, 1984).

Frekuensi gelombang radar yang dipancarkan dapat diatur dengan mengganti antenna. Dimensi antenna bervariasi dengan frekuensi gelombang radar, sebagai misal antenna 1 Ghz berukuran 30 cm sedangkan antenna 25 MHz mempunyai panjang 6 m (Astutik, 2001). Pemilihan frekuensi yang digunakan

tergantung pada ukuran target, aproksimasi range kedalaman dan aproksimasi maksimum kedalaman penetrasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.3.

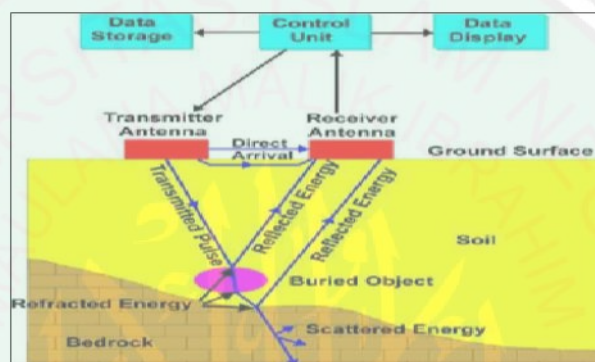
Tabel 2.3 Resolusi dan daya tembus gelombang radar

Sumber: Mala Geoscience, 1997

Frekuensi Antena (MHz)	Ukuran Target Minimum yang Terdeteksi (m)	Aproksimasi Range Kedalaman (m)	Penetrasi Kedalaman Maksimum (m)
25	$\geq 1,0$	5-30	35-60
50	$\geq 0,5$	5-20	20-30
100	0,1-1,0	5-15	15-25
200	0,05-0,50	1-10	5-15
400	$\approx 0,05$	1-5	3-10
1000	0,01	0,05-2	0,5-4

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 antenna 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 (Mala Geoscience, 1997).



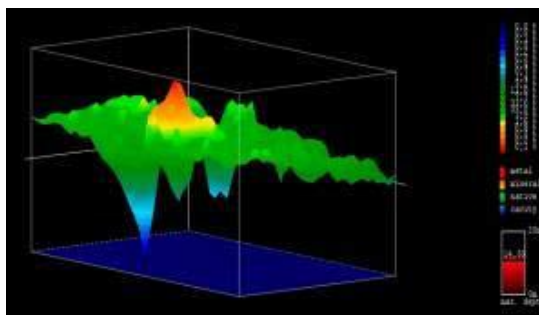
Gambar 2.9 Akuisisi Data GPR (Astutik, 1997)

GPR secara berkala memancarkan gelombang elektromagnetik ke bawah permukaan bumi, dan pantulannya ditangkap oleh antenna penerima. Hasil tangkapan ini direkam oleh GPR, dan hasilnya berupa gambar (*image*). Dalam paket software Future Series 2005 objek bawah permukaan yang diamati akan ditampilkan dalam bentuk display berupa variasi warna yang merepresentasikan struktur bawah permukaan pada lokasi tersebut. Tahapan untuk memperoleh display data diawali dengan memancarkan sinyal dari transmitter ke objek yang dituju dan setelah melewati struktur bawah permukaan sinyal tersebut akan memantul kemudian diterima oleh receiver (prinsip gelombang seismik). Data yang diterima oleh receiver selanjutnya diteruskan ke control unit kemudian

control unit melakukan pengolahan sinyal yang diterima kemudian mengubahnya dalam bentuk display gambar (Astutik, 1997).

GPR Future Series 2005 mempunyai beberapa perbedaan dengan GPR konvensional pada umumnya yaitu pada GPR Future Series 2005 pada antenna terdiri dari beberapa *receiver* dan satu *transmitter* yang berada di tengah-tengah antenna sehingga outputnya berupa kontur yang menggambarkan penampang horisontal dari zona penelitian. Sedangkan pada GPR konvensional terdiri dari satu *transmitter* dan satu *receiver* dan outputnya yaitu penampang vertikal yang berupa satu gelombang untuk setiap pengukuran. Dan pengukuran dilakukan berulang-ulang kemudian hasilnya digabungkan lalu dilakukan pengolahan data lanjutan (Chamberlain, 2000 dalam Bahri, 2009).

Apabila GPR Future Series 2005 dibawa berjalan (menurut garis lurus), gambar yang dihasilkan akan membentuk pola-pola tertentu, bergantung kepada objek yang ditumbu oleh impuls elektromagnetik itu dan waktu tempuh sinyal (yang bergantung kepada kedalaman objek). Berikut ini adalah contoh gambar keluaran dari GPR Future Series 2005 beserta sedikit penjelasan tentang pola-pola gambar di dalamnya, yang disebut sebagai difraksi (Astutik, 1997 dalam Bahri, 2009).



Gambar 2.10 Output GPR (Astutik, 1997 dalam Ayi, 2009)

Sumbu horizontal adalah sampling impuls yang dipancarkan. Sumbu vertikal adalah jarak kedalaman atau waktu tempuh sinyal impuls dari pemancar ke penerima. GPR memiliki keterbatasan kehandalan operasi hanya sampai beberapa meter di bawah permukaan. Semakin konduktif objek yang ditumbu, maka akan semakin jelas sinyal yang ditangkap. Kabel listrik adalah tembaga yang berkonduktivitas sangat baik, sehingga akan memberikan pola yang jelas pada gambar keluaran GPR. Pada contoh gambar tersebut ada anomali yang ditunjukkan oleh warna kuning yang menunjukkan adanya mineral di daerah tersebut. Anomali lainnya ditunjukkan oleh warna biru. Warna biru menunjukkan pada kita bahwa daerah yang kita jadikan objek penelitian memiliki zona cavity atau zona kosong (Astutik, 1997 dalam Ayi, 2009).

2.8.4 Parameter Antena GPR

Peranan antena dalam aplikasi GPR sangat penting dalam menentukan performansi sistem. Pada prinsipnya, kriteria umum untuk sistem antena impuls GPR harus mempertimbangkan kopling yang baik antara antena dengan tanah. Antena GPR biasanya beroperasi dekat dengan tanah (permukaan tanah) maka harus dapat mengirimkan medan elektromagnetik melalui *interface* antena tanah secara efektif. Akan tetapi, ketika antena diletakkan dekat dengan tanah, interaksi antena tanah akan berpengaruh besar terhadap impedansi input antena, bergantung jenis tanah dan elevasi antenanya (Turner, 1993 dalam Bahri, 2009).

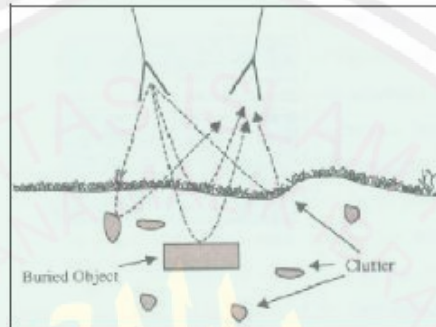
Karena properti elektrik tanah sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, dalam survei GPR biasanya sangat sulit untuk menjaga kestabilan impedansi input karena jenis tanah yang benar-benar berbeda untuk setiap tempat dan kondisi

cuaca yang berbeda. Ini mengakibatkan sulitnya mempertahankan kondisi *match*, antara antenna dan *feed line* untuk memperkecil *mismatch loss*. Pemilihan jenis antenna GPR yang dipakai didasarkan juga pada objek apa yang akan dideteksi. Apabila target objek mempunyai objek yang panjang maka sebaiknya menggunakan antenna yang dengan *footprint* yang lebih panjang. *Footprint* antenna adalah pengumpulan nilai tertinggi dari bentuk gelombang yang dipancarkan oleh antenna pada bidang horizontal di dalam tanah atau permukaan tanah di bawah antenna. Ukuran *footprint* antenna menentukan resolusi cakupan melintang dari sistem GPR. Secara umum, unjuk kerja optimal GPR dimana *footprint* antenna harus dapat diperbandingkan dengan penampang melintang horizontal dari target. Berdasarkan keterangan di atas, antenna untuk aplikasi GPR harus memperhatikan beberapa hal yaitu (Telford dalam Bahri, 2009):

1. Late time ringing

Antena GPR harus mampu meminimalkan *late time ringing* yang disebabkan oleh refleksi internal terhadap benda-benda (*clutter*) disekitar target yang mengakibatkan efek masking terhadap objek yang dideteksi. *Late time ringing* merupakan osilasi yang mengikuti pulsa yang dikirimkan. Osilasi ini dapat mengaburkan sinyal yang dipantulkan oleh objek sehingga menyulitkan untuk dilakukan proses deteksi. Ada berbagai cara untuk mengurangi *late time ringing* khususnya dari penggunaan antenna dipole yaitu dengan penggunaan *lumped resistor*. Hal ini sesuai dengan metode Wu King. Namun, penggunaan metode ini sesuai untuk antenna dipole yang dibuat pada PCB (*Printed Circuit Board*). Untuk antenna wire dipole, hal ini bisa diatasi dengan meletakkan antenna

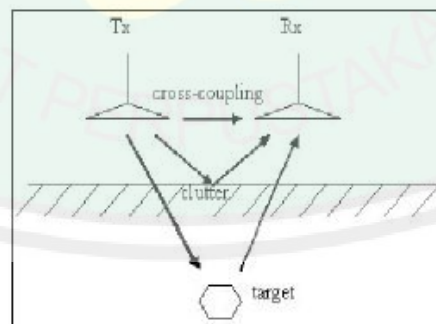
tepat di atas permukaan tanah karena sifat lossy dielektrik tanah tersebut mampu meredam sifat ringing dari antena wire dipole, sehingga sinyal tersebut dapat dianalisa dengan akurat (Telford dalam Bahri, 2009).



Gambar 2.11 *Late Time Ringing* (Telford dalam Bahri, 2009)

2. Cross-Coupling

Pada konfigurasi antena yang terpisah, tentunya akan menimbulkan *crosscoupling*. *Cross-coupling* merupakan sinyal yang dikirimkan secara langsung oleh antena pengirim ke penerima (Telford dalam Bahri, 2009).



Gambar 2.12 *Cross-Coupling* (Telford dalam Bahri, 2009)

Untuk memaksimalkan pada target yang dideteksi maka antara antena pengirim dan penerima harus dipisahkan dengan jarak berdasarkan rumus berikut ini (Telford dalam Bahri, 2009):

$$S = \frac{2depth}{\sqrt{K}-1} \quad (2.12)$$

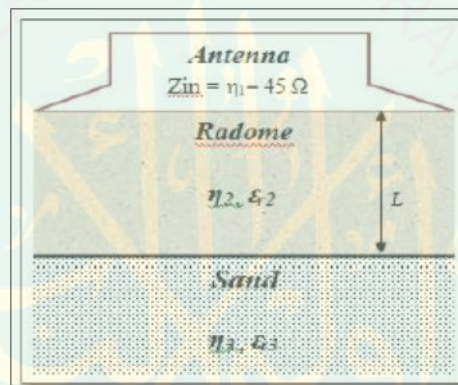
Keterangan :

S = Jarak antar antenna pemancar dengan penerima

K = Konstanta propagasi (ϵ_r)

Depth = Kedalaman penetrasi antenna

3. Jarak Antena dengan Tanah



Gambar 2.13 Jarak Antena dengan Tanah (Telford dalam Bahri, 2009)

$$\eta_{Udara} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \Omega \quad (2.13)$$

$$\eta_m = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \Omega \quad (2.14)$$

$$\eta_2 = \sqrt{\eta_1 \eta_3} \quad (2.15)$$

Keterangan :

η_{udara} = Impedansi karakteristik di udara (Ω)

η_m = Impedansi karakteristik pada medium dengan nilai ϵ_r tertentu (Ω)

η_1 = Impedansi karakteristik medium 1 (Antena) (Ω)

η_2 = Impedansi karakteristik medium 2 (*Radome*) (Ω)

η_3 = Impedansi karakteristik medium 3 (Tanah) (Ω)

μ_r = Permeabilitas bahan (H/m)

ϵ_r = Permittivitas bahan (F/m)

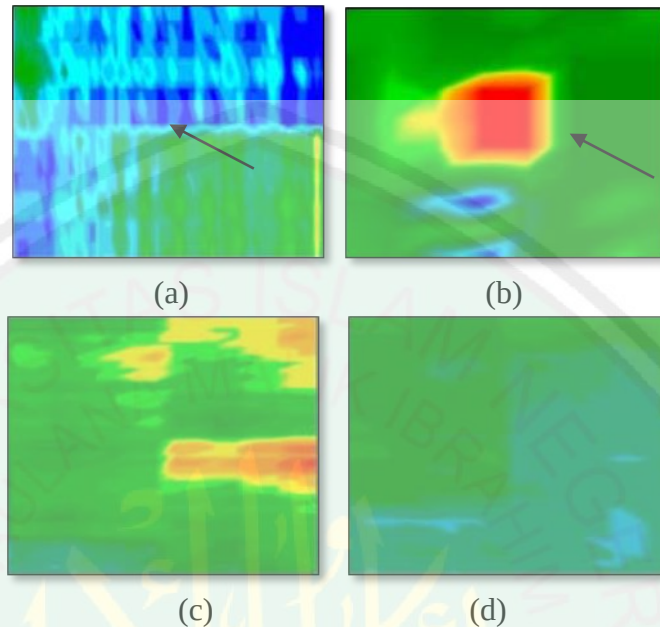
L = Jarak antara dua medium yang terpisahkan oleh *radome*

Berikut ini adalah tabel yang menunjukkan data jarak antenna dengan tanah dengan berbagai variasi permittivitas (Telford dalam Bahri, 2009).

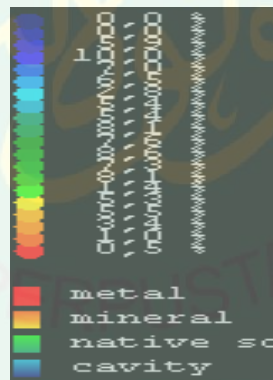
Tabel 2.4 Data Jarak Antena dengan Tanah dengan Berbagai Variasi Permittivitas
Sumber: Telford dalam Bahri, 2009

Permittivitas Jenis Tanah (ϵ_{r1})	Radom yang Diperlukan (ϵ_{r2})	Jarak antenna-tanah (cm)		
		f = 200 MHz	f = 600 MHz	f = 1 GHz
4	16,7	18,35	6,1	0,61
9	25,1	14,97	4,99	0,99
16	33,5	12,95	4,32	0,86
25	41,87	11,69	3,86	0,77
30	45,88	11,07	3,69	0,74

Saat antenna diletakkan dekat dengan tanah, interaksi antenna tanah sangat berpengaruh terhadap impedansi input antenna, bergantung jenis tanah dan elevasi antenanya. Pada paket software Future 2005 jenis-jenis tanah dapat terlihat dari pola warna yang muncul pada penampang data seismik dari hasil pengambilan data. Sebagai contoh saat pengambilan data di daerah karst di dinding gua Seropan pola-pola warna yang muncul bisa digambarkan sebagai berikut (Astutik, 1997 dalam Bahri, 2009):



Gambar 2.14: (a) *Cavity Area*, (b) *Metal*, (c) *Dry Karst*, (d) *Wet Karst* (Astutik dalam Bahri, 2009)



Gambar 2.15 Struktur dan Jenis Objek Digolongkan Berdasar Variasi Warna pada Output GPR Future Series 2005 (Astutik dalam Bahri, 2009)

Warna biru pada *display* gambar menunjukkan *cavity area* (daerah rongga). Warna merah yang membentuk pola tertentu seperti pada gambar 2.14 ((a) *Cavity Area*) yang membentuk kubus menunjukkan adanya logam di daerah tersebut. Warna kuning menunjukkan daerah tersebut adalah daerah kering sedangkan warna kuning kemerah-merahan menunjukkan adanya mineral pada

daerah tersebut. Dan warna hijau yang agak gelap menunjukkan daerah tersebut merupakan daerah basah. Pada legenda GPR *Future Series* 2005 dari atas ke bawah (biru menuju merah) menunjukkan bahwa konduktivitasnya semakin besar dan resistivitasnya semakin kecil. Sedangkan dari bawah ke atas (merah menuju biru) konduktivitasnya semakin kecil dan resistivitasnya semakin besar (Astutik, 1997 dalam Bahri, 2009).



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 16 April 2016. Lokasi penelitian adalah *sinkhole*/luweng dan gua yang terletak di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur, dimana *sinkhole*/luweng dan gua tersebut terletak pada koordinat $8^{\circ}18'21,67''$ - $8^{\circ}18'23,28''$ LS dan $112^{\circ}28'39,54''$ - $112^{\circ}28'42,04''$ BT. Topografi di sekitar luweng dan gua adalah lahan persawahan masyarakat. Pengolahan data bertempat di Laboratorium Geofisika Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.



Gambar 3.1 Cakupan Area Penelitian

Keterangan:

Area penelitian (43m x 22,5m)

3.2 Data Penelitian

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah:

1. Koordinat Lintang dan Bujur,
2. Waktu pengambilan data (jam, hari dan tanggal),
3. Ketinggian titik ukur,
4. Data GPR (*Ground Penetrating Radar*) yakni Scan 2D.

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Ground Penetrating Radar (GPR) Future Series 2005* dengan memanfaatkan sifat elektromagnetik berupa travel time dari gelombang radio yang memiliki rentang frekuensi 25-1000 MHz. Alat *Ground Penetrating Radar (GPR) Future Series 2005* ini terdiri dari unit-unit pokok yaitu:

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1. Gagang Sensor | 1 Buah |
| 2. <i>Power Supply Unit</i> | 1 Buah |
| 3. | <i>Control</i> |
| <i>Unit</i> | 1 Buah |
| 4. | Kabel |
| penghubung setiap unit | 1 Buah |
| 5. Sensor | 1 Buah |
| 6. Meteran | 1 Buah |
| 7. <i>Notebook PC</i> | 1 Buah |
| 8. <i>Bluetooth</i> | 1 Buah |
| 9. Perangkat Lunak | - <i>Visualizer 3D</i> |

- Google Earth

3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Prosedur pelaksanaan penelitian ini terdiri dari 3 tahap yakni, tahap pra-akuisisi data, tahap akuisisi data dan tahap pasca akuisisi data.

3.4.1 Tahap Pra-Akuisisi Data

Tahap Pra-Akuisisi data ini terdiri dari studi pustaka, informasi litologi dan studi lapangan. Studi pustaka adalah mempelajari literatur-literatur yang berhubungan dengan bahasan mengenai karakteristik batuan menggunakan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) (Uswatun, 2015).

Tahap informasi litologi bertujuan untuk mengetahui kondisi litologi batuan di daerah penelitian yang mempengaruhi tingkat kerentanan bawah permukaan tanah (Uswatun, 2015).

3.4.2 Tahap Akuisisi Data

Tahap Akuisisi data ini terdiri dari tahap pengambilan data yang dilakukan di daerah penelitian yakni Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur, dengan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) *Future Series* 2005. Dalam tahap pengambilan data ini akan dilakukan scan karakteristik batuan dengan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) *Future Series* 2005 di sekitar daerah amblesan tanah atau luweng/shinkhole dan gua dengan beberapa lintasan. Masing-masing lintasan tersebut memiliki panjang yang berbeda-beda yakni mulai dari 3 meter; 6,5 meter; 10 meter sampai dengan 13,5 meter.

3.4.2.1 Teknik Pengambilan Data (Akuisisi Data)

Teknik pengambilan data terdiri dari beberapa langkah yaitu:

1. Menentukan lintasan, jumlah lintasan dan panjang lintasan yang akan dilakukan pengambilan data.
2. Menyusun alat *Ground Penetrating Radar* (GPR) sesuai prosedur.
3. Menghidupkan *Power Supply*.
4. Menentukan implus pada *Ground Penetrating Radar* (GPR) yang akan digunakan pengambilan data.
5. Menghubungkan alat *Ground Penetrating Radar* (GPR) dengan *notebook PC* menggunakan *bluethoot*.
6. Menekan tombol *ready* pada *Ground Penetrating Radar* (GPR).
7. Melakukan pengambilan data dengan cara menjalankan sensor *Ground Penetrating Radar* (GPR) di atas permukaan tanah.
8. Mengulangi langkah-langkah diatas pada lintasan selanjutnya.

3.4.2.2 Teknik Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan *software visualizer 3D* yang merupakan satu paket dengan *Ground Penetrating Radar* (GPR) *Future Series 2005* yang akan menampilkan hasil pengambilan data secara langsung. Rangkaian alat *Ground Penetrating Radar* (GPR) *Future Series 2005* dikoneksikan dengan memanfaatkan teknologi *bluethoot*.

3.4.2.3

Teknik

Interpretasi Data

Teknik analisis data dengan cara menentukan zona rawan amblesan tanah (*sinkhole*/luweng) berdasarkan keberadaan zona *cavity* (zona kosong/rongga-rongga bawah permukaan tanah) yang tercantum pada *output software visualizer 3D* yang kemudian dilanjutkan dengan menentukan kedalaman dari zona *cavity* (zona kosong/rongga-rongga bawah permukaan tanah) tersebut.

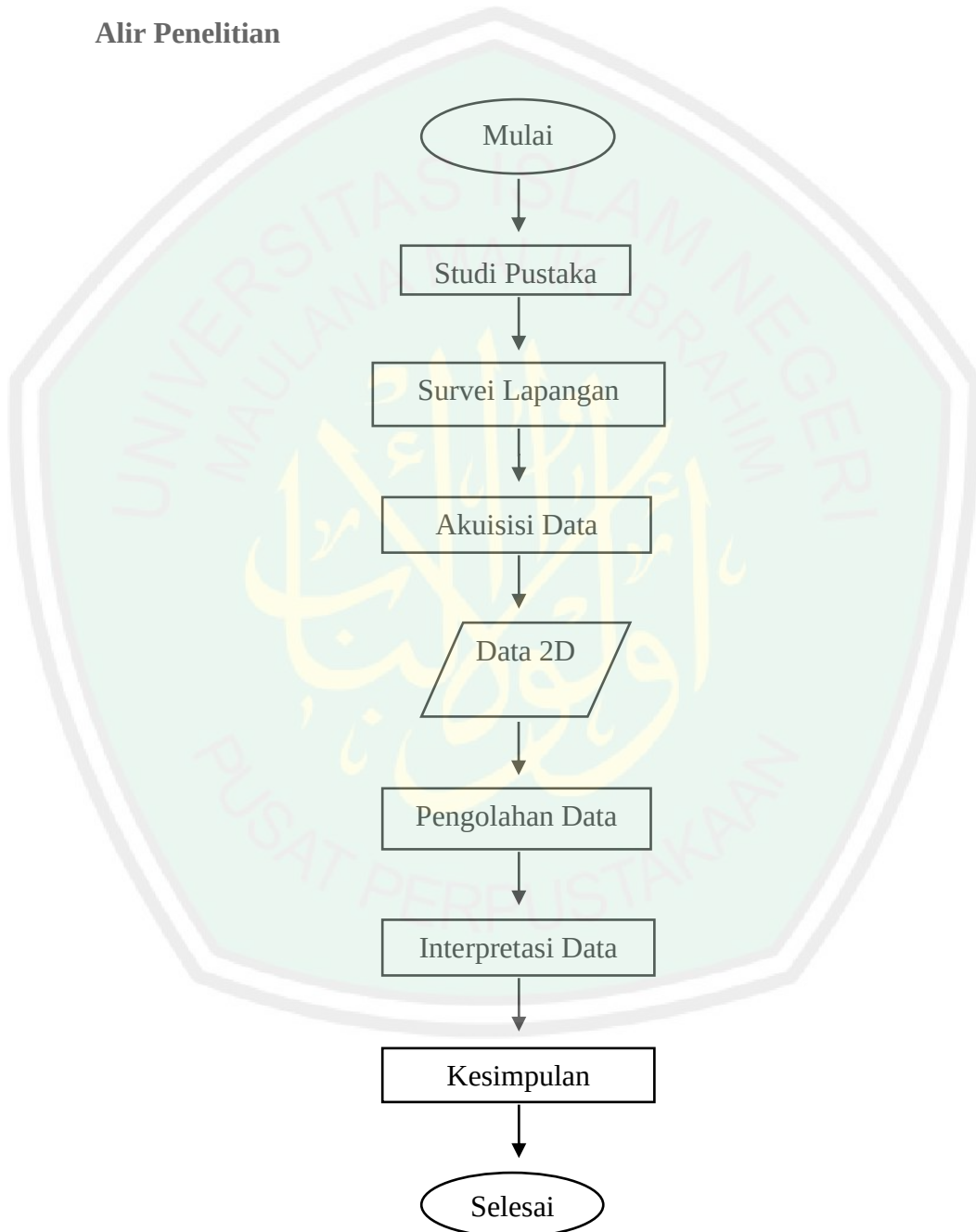
3.4.3 Tahap Pasca Akuisisi Data

Tahapan ini terdiri dari tahap analisis atau interpretasi data penelitian yang diperoleh dari tahap penelitian. Data penelitian ini berupa data scan 2D yang akan diolah dengan *software Visualizer 3D* sehingga dapat diinterpretasikan berdasarkan spektrum gelombang elektromagnetik yang menggambarkan sebaran zona rawan amblesan tanah berdasarkan keberadaan zona *cavity* (zona kosong/rongga-rongga bawah permukaan tanah) dari daerah penelitian.

3.5

Alir Penelitian

Diagram



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Survei

Hasil pengolahan data yang didapatkan akan dianalisis pada bab ini. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi gua-gua bawah tanah dan zona rawan amblesan tanah pada struktur gamping di daerah studi berdasarkan interpretasi data *GPR (Ground Penetrating Radar) Future Series 2005*. Analisis dilakukan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan secara geometri yang berdasarkan pada data georadar atau *Ground Penetrating Radar (GPR) Future Series 2005* yang menunjukkan radiasi gelombang elektromagnetik dimana radiasi gelombang elektromagnetik berhubungan dengan konduktivitas dan konstanta dielektrik gelombang elektromagnetik serta data geologi yang diperoleh dari studi literatur peta geologi.

4.1.1 Akuisisi Data

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Ground Penetrating Radar (GPR) Future Series 2005*. Alat *Ground Penetrating Radar (GPR) Future Series 2005* ini terdiri dari unit-unit pokok yaitu: Gagang Sensor, *Power Supply Unit*, *Control Unit*, Kabel penghubung setiap unit, Sensor, Meteran, *Notebook PC/Laptop*, *Bluetooth*, masing-masing berjumlah 1 buah.



Gambar 4.1 Seperangkat Alat GPR *Future Series* 2005 (Rahmawan, 2014)



Gambar 4.2 Meteran
(Rahmawan, 2014)



Gambar 4.3 Laptop

Seperangkat alat GPR *Future Series* 2005 selanjutnya akan disusun. Dimulai dengan power tank yang akan dirangkai dengan control unit. Kemudian control unit dirangkai dengan headset, Bluetooth dan receiver-transmitter. Setelah itu receiver transmitter dipasang pada gagang pegangan dan diikatkan pada tangan pembawa control unit dan diatur posisi dan panjang gagang agar tingginya tepat di atas permukaan tanah. Receiver-transmitter diatur panah segitiganya menghadap ke bawah, agar sinyal impuls dipancarkan ke bawah.



Gambar 4.4 *Power Tank* Dihubungkan dengan *Control Unit* Melalui Kabel



Gambar 4.5 Transmitter-Receiver Terpasang pada Gagang dan Menghadap Bawah

Setelah penyusunan alat selesai, maka selanjutnya adalah menghidupkan laptop yang telah terinstall *Software Visualizer 3D*, berikut adalah kenampakan dari *software Visualizer 3D*



Gambar 4.6 Kenampakan *Software Visualizer 3D* pada Layar Laptop

Untuk tahap selanjutnya pada bagian control unit dilakukan pengaturan, yaitu ketika control unit telah disambungkan dengan power tank maka lampu akan berwarna hijau yang dalam keadaan 'on'. Setelah itu tombol on-off yang berada di bagian bawah control unit ditekan maka alat akan mengeluarkan bunyi tit, tunggu hingga bunyi hilang. Kemudian akan muncul pilihan metode yang digunakan pilih metode ground scan dengan cara memindahkan pilihan ke atas atau bawah pada tombol pemilih dan diklik ok pada pilihan ground scan tersebut. Selanjutnya akan muncul pilihan mode yang digunakan yang pertama mode otomatis dan yang kedua mode manual, dipilih mode otomatis. Perbedaan kedua mode ini adalah hasil yang didapatkan apakah langsung ditampilkan atau disimpan dahulu dalam

memori. Kemudian muncul pengaturan impuls atau banyaknya pemancaran gelombang yang digunakan, pilih 20-50 impuls dan diklik ok. Setelah itu muncul pilihan mode penampilan yaitu; transfer data ke computer dan ke memori, pada pilihan transfer data ke computer klik ok. Pada layar laptop akan terlihat pemberitahuan pada layar pojok kanan bawah, kemudian diklik dan muncul menu Bluetooth, ketikkan password “OKM” yang diinginkan dan diklik ok. Setelah terkoneksi dengan laptop maka siap untuk dilakukan pengukuran. Ketika akan memulai pengukuran diklik tombol hijau pada control unit dan alat akan mulai memancarkan impuls.



Gambar 4.7 Control Unit Future Series 2005

Setiap pengukuran line baru selalu dimulai dengan menekan tombol hijau. Untuk membuat dokumen baru pada software diklik file dan pilih *new document*. Kemudian akan muncul menu pilihan pengukuran, pada device dipilih *Future Series 2005* dan diklik ok.



Gambar 4.8 Tombol Hijau Pada Control Unit



Gambar 4.9 Proses Pengambilan Data

4.1.2 Desain Survei



Gambar 4.10 Desain Survei Lokasi Pengambilan Data

Pada penelitian ini, daerah pengambilan data dibagi menjadi 2 bagian yaitu daerah bagian sekitar gua dan daerah bagian sekitar *sinkhole*/luweng, hal tersebut dilakukan karena antara gua dan *sinkhole* terdapat daerah persawahan tebu yang tidak memungkinkan untuk dilakukannya pengambilan data. Area persawahan tebu tersebut memiliki lebar sekitar 35,7 meter. *sinkhole*/luweng dan gua memiliki kedalaman sekitar 7-10 meter dibawah permukaan.

Daerah penelitian pertama adalah daerah bagian sekitar gua yang dibagi lagi menjadi 2 daerah pengambilan data, yakni daerah pengambilan data 1 dan daerah pengambilan data 2. Daerah pengambilan data 1 terdiri dari 3 line masing-masing line memiliki panjang 10 meter dari gua ke arah utara dengan impuls masing-masing line 50. Daerah pengambilan data 2 terdiri dari 3 line masing-masing line memiliki panjang 10 meter dari gua ke arah selatan. Jarak antar line sepanjang gagang receiver-transmitter kurang lebih 1.5 meter, jadi total luas daerah penelitian pertama adalah 20 meter x 9 meter persegi.

Daerah penelitian kedua adalah daerah bagian sekitar *sinkhole*/luweng yang terbagi lagi menjadi 7 daerah pengambilan data, yakni daerah pengambilan data 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7. Daerah pengambilan data 1, 2 dan 3 masing-masing terdiri dari 3 line kecuali daerah pengambilan data 3 terdiri dari 4 line dan tiap line tersebut masing-masing memiliki panjang 6,5 meter dari *sinkhole*/luweng ke arah selatan, dengan impuls masing-masing line 50. Untuk daerah pengambilan data 4 terdiri dari 4 line. Masing-masing line memiliki panjang sekitar 3 meter dari *sinkhole*/luweng ke arah utara, dengan impuls masing-masing line 20. Kami menggunakan impuls 20 untuk tiap line pada daerah pengambilan data 4, hal tersebut dikarenakan pada daerah penelitian data 4 tidak terdapat banyak penghalang yang bisa menghalangi jalannya transmitter-receiver dalam pengambilan data, selain itu panjang lintasan hanya 3 meter sehingga bisa dicapai hanya dengan impuls 20. Selanjutnya adalah daerah pengambilan data 5, 6 dan 7. Masing-masing daerah pengambilan data tersebut memiliki 2 line dan tiap-tiap line memiliki panjang 13,5 meter dari samping *sinkhole*/luweng ke arah timur,

kecuali untuk line 2 pada daerah pengambilan data 7 hanya memiliki panjang line sekitar 6,5 meter dengan impuls 50 untuk tiap-tiap line. Luas daerah penelitian kedua sekitar 23 meter x 13,5 meter persegi. Jadi untuk total luas daerah penelitian keseluruhan adalah sekitar 43 meter x 22,5 meter persegi.

Pada pengambilan data digunakan impuls 50 dan 20. Penggunaan besar impuls ini didasarkan pada *range impuls* yang representatif yaitu mempunyai jarak diantara dua impuls yakni 20 hingga 30 centimeter. Semakin kecil jarak dalam range tersebut semakin baik hasil pencitraannya. Seperti yang diterangkan dalam persamaan berikut ini (M.Jol.Harry, 2009):

$$\text{Impuls} = \frac{S_{\text{line}}}{S_{\text{impuls}}} \quad (3.1)$$

Dimana:

S_{line} = Panjang Line

S_{impuls} = Jarak impuls dalam range 20-30 Centimeter

Pengambilan data pada line yang memiliki panjang line (S_{line}) sepanjang 10 meter; 6,5 meter dan 13,5 meter menggunakan impuls 50 banyak dipotong pada impuls 50, sehingga jarak impuls untuk yang panjang linanya 10 meter adalah 20 centimeter, untuk yang panjang linanya 6,5 meter adalah 13 centimeter dan untuk yang panjang linanya 13,5 meter adalah 27 centimeter. Sedangkan pengambilan data pada line yang memiliki panjang line (S_{line}) sepanjang 3 meter menggunakan impuls 20 banyak dipotong pada impuls 20, sehingga jarak impuls untuk panjang linanya 3 meter adalah 15 centimeter.

4.1.3 Kondisi Geologi Lokasi Penelitian

Sebelum melakukan penelitian hal penting yang harus dilakukan adalah mengetahui benar kondisi geologi lokasi penelitian. Perlu diketahui bahwa penelitian ini dilakukan di Desa Sumbermanjing Kulon, Kecamatan Pagak, Kabupaten Malang. Kondisi geologi lokasi penelitian tersebut jika ditinjau melalui peta geologi lembar Blitar (1507-6), skala 1:100.000 yang diterbitkan oleh M. Z. Sjarifudin dan S. Hamidi dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Direktorat Jenderal Geologi dan Sumber Daya Mineral yang dibawah oleh Departemen Pertambangan dan Energi Republik Indonesia, dijelaskan bahwa simbol *startigrafi* yang ada di Desa Sumbermanjing Kulon Kecamatan Pagak Kabupaten Malang termasuk Tmn (termasuk simbol triasic / sedimen), Tmn adalah formasi Nampol yang berupa batu gamping pasir, batu gamping tufan, batu lempung dan batu napal. Formasi Nampol (Tmn) ini berhubungan dengan formasi Wonosari (Tmwl) dan antara Formasi Campurdarat (Tmcl) dan Formasi Wuni (Tmw) yang menjemari.

Batuan formasi Wonosari:

1. Batu Gamping

1. Batu gamping koral, warna putih keruh kelabu, banyak mengandung fosil foram, ganggang, dengan permukaan kasar dan tajam, tebal lapisannya berkisar 3 – 50 m
2. Batu gamping lempungan, warna kelabu – kehitaman, berfosil foram, sebagai perselingan dengan lainnya dan tebalnya beberapa puluh centimeter.

3. Batu gamping tufan, warna kelabu terang, setempat berbentuk fosil moluska, algae, sebagai perselingan dengan batu gamping pasiran, tebal lapisan 0,5 – 20 cm.
4. Batu gamping pasiran, tekstur kasar sampai sedang, berwarna kelabu hingga coklat, mengandung kalsit, kuarsa dan mineral mafik, tebal lapisan 0,5 – 2 m.
2. Bahan 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 cokelat merah, tebal lapisan antara 5 dan 20 cm, sebagai sisipan dalam batu gamping.

Fosil dalam batu gamping yang dapat dikenal adalah: *Miogypsina*, *Lepidocyliina*, *Amphistegina*, *Cyclocypheus*, *Quinqueloculina*. Dengan adanya adanya *Miogypsina* dan *Lepidocyliina*. Umur nisbi batuan berkisar dari Miosen tengah atau pada jenjang Ta akhir sampai Tf awal. Di dalam batu gamping yang lain ditemukan juga *Orbulina* dan *Globigeneridae* serta membawa jenis bentos yang menunjukkan umur nisbinya Miosen akhir atau jenjang Tf akhir.

Kesimpulannya, umur formasi Wonosari adalah Miosen Tengah – Miosen Akhir atau N12 – N17. Lokasi tipenya terletak di daerah Wonosari (Lembar Surakarta dan Giritontro). Formasi ini menindih formasi campurdarat dan satuan batuan tua lainnya. Tebal satuan batuan ini berkisar antara 80 – 200 m.

Sebarannya terdapat di bagian selatan Lembar dan menerus ke timur pada Lembar Geologi Turen. Nama satuan ini di usulkan oleh Bothe (1929) dan dapat dikorelasikan dengan Formasi Punung (Sartono, 1964).

Struktur dan tektonika pada Miosen Awal terjadi penurunan diikuti genang laut yang mengendapkan formasi Campurdarat (Tmcl) dan dilain pihak terjadi kegiatan gunung api formasi Wuni (Tmw). Setelah pelipatan, terobosan, pengangkatan dan erosi, terjadi pengendapan di lingkungan darat yang disusul dengan genang laut pada Miosen tengah dan menghasilkan Formasi Jaten (tak terpetakan oleh badan geologi), sebagian *Litologinya* merupakan hasil rombakan batuan terubah (terprolipitkan) dan batuan terobosan, dipihak lain terjadi kegiatan gunung api yang diikuti pengendapan formasi Wonosari (Tmwl). Seterusnya dalam kondisi cekungan pada Miosen Akhir memungkinkan berkembangnya koloni koral yang merupakan kelanjutan pembentukan formasi Wonosari. Di beberapa tempat, batu gamping tersebut diikuti pengendapan batu lempung pada lingkungan peralihan. Di beberapa tempat umumnya formasi Wonosari bercampur dengan bahan gunung api. Setelah itu pengangkatan dan pelipatan mungkin terjadi pada Plio – Plistosen disusul dengan proses denudasi. Kegiatan tektonika ini hanya berakibat miringnya formasi wonosari ke arah selatan dengan sudut kemiringan sampai 10°.

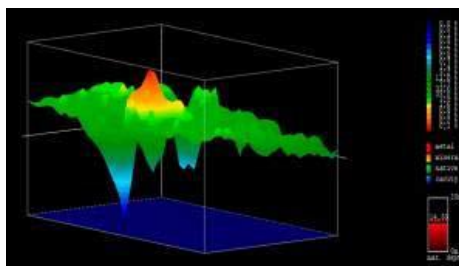


Gambar 4.11 Peta Geologi Lembar Blitar (Sjarifudin dan Hamidi, 1507-6)

4.1.4 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan *software visualizer 3D* yang merupakan satu paket dengan GPR *Future Series* 2005 yang akan menampilkan hasil pengambilan data secara langsung. Rangkaian alat GPR *Future Series* 2005 dikoneksikan dengan memanfaatkan teknologi *bluetooth*.

Apabila GPR *Future Series* 2005 dibawa berjalan (menurut garis lurus), gambar yang dihasilkan akan membentuk pola-pola tertentu, bergantung kepada objek yang ditumbu oleh impuls elektromagnetik itu dan waktu tempuh sinyal (yang bergantung kepada kedalaman objek). Berikut ini adalah contoh gambar keluaran dari GPR *Future Series* 2005 beserta sedikit penjelasan tentang pola-pola gambar di dalamnya, yang disebut sebagai difraksi.



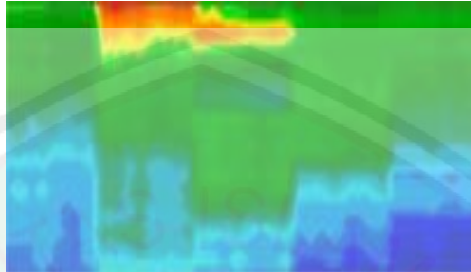
Gambar 4.12 Output 3D GPR *Future Series* 2005 (Astutik, 1997 dalam Ayi, 2009)

Sumbu horizontal adalah sampling impuls yang dipancarkan. Sumbu vertikal adalah jarak kedalaman atau waktu tempuh sinyal impuls dari pemancar ke penerima. GPR memiliki keterbatasan kehandalan operasi hanya sampai beberapa meter di bawah permukaan. Semakin konduktif objek yang ditumbu, maka akan semakin jelas sinyal yang ditangkap. Kabel listrik adalah tembaga yang berkonduktivitas sangat baik, sehingga akan memberikan pola yang jelas pada gambar keluaran GPR. Pada contoh gambar tersebut ada anomali yang ditunjukkan oleh warna biru yang menunjukkan *cavity area* (daerah rongga), warna merah menunjukkan adanya logam di daerah tersebut, warna kuning menunjukkan daerah tersebut adalah daerah kering sedangkan warna kuning kemerah-merahan menunjukkan adanya mineral pada daerah tersebut, warna hijau cerah menunjukkan daerah tersebut merupakan daerah karst kering dan warna hijau yang agak gelap menunjukkan daerah tersebut merupakan daerah karst basah.

Pada legenda GPR *Future Series* 2005 dari atas ke bawah (biru menuju merah) menunjukkan bahwa konduktivitasnya semakin besar dan resistivitasnya semakin kecil. Sedangkan dari bawah ke atas (merah menuju biru) konduktivitasnya semakin kecil dan resistivitasnya semakin besar (Astutik, 1997 dalam Bahri, 2009).

Saat antenna diletakkan dekat dengan tanah, interaksi antenna tanah sangat berpengaruh terhadap impedansi input antenna, bergantung jenis tanah dan elevasi antenanya. Pada paket *software Future Series* 2005 jenis-jenis tanah dapat terlihat dari pola warna yang muncul pada penampang data seismik dari hasil pengambilan data. Sebagai contoh saat pengambilan data di daerah karst di

dinding gua Seropan pola-pola warna yang muncul bisa digambarkan sebagai berikut (Astutik, 1997 dalam Bahri, 2009):



Gambar 4.13 *Output 2D GPR Future Series 2005* (Astutik, 1997 dalam Ayi, 2009)

4.2 Pembahasan

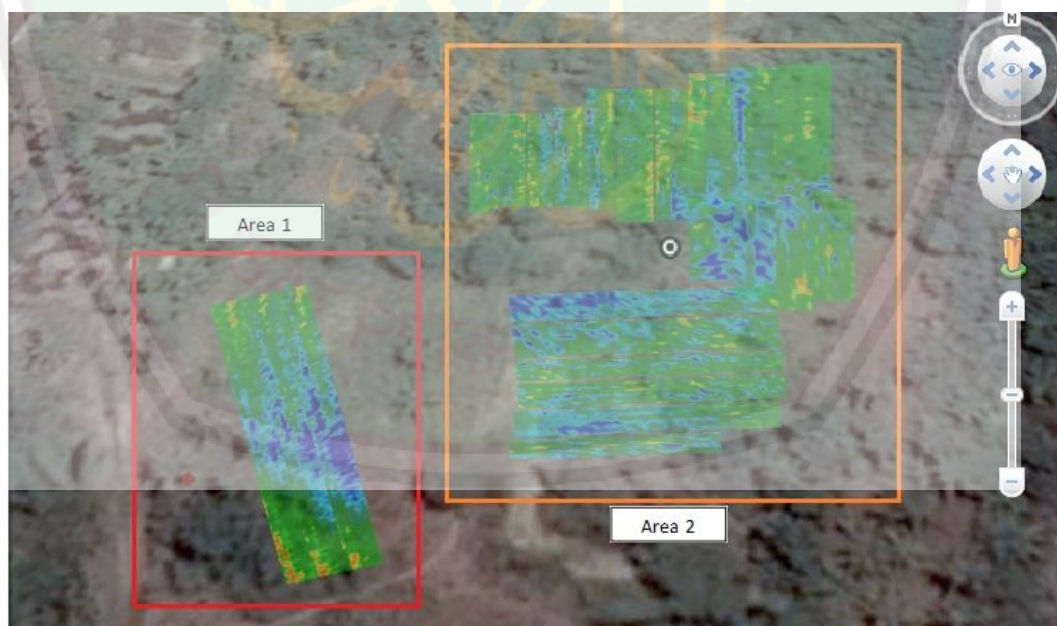
4.2.1 Interpretasi Kualitatif

Dalam mengidentifikasi gua-gua bawah tanah sebagai upaya mitigasi dini bencana timbulnya *sinkhole*/luweng baru serta untuk mengetahui atau meninjau adanya zona rawan amblesan tanah pada daerah berstruktur gamping/karst di daerah penelitian, maka diperlukan pengamatan terhadap kondisi bawah permukaan tanah dengan menggunakan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) *Future Series 2005*.

Interpretasi secara kualitatif dilakukan untuk menganalisis daerah yang memiliki anomali yang diduga adanya *body*/benda penyebab anomali yang menjadi target penelitian. Interpretasi secara kualitatif dilakukan terhadap hasil visualisasi yang ditunjukkan dengan warna-warna yang berbeda, warna biru yang mengindikasikan pengukuran yang bernilai negative dan dapat dianggap sebagai keberadaan rongga-rongga (*zona cavities*), deposit air, penimbunan, atau penggalian pada tanah, pada penelitian ini warna biru diinterpretasikan sebagai adanya rongga-rongga (*zona cavities*), warna kuning diinterpretasikan sebagai daerah kering, warna orange mengindikasikan terjadinya mineralisasi di dalam

permukaan tanah, sehingga warna orange pada penelitian ini diinterpretasikan sebagai adanya mineral, warna merah diinterpretasikan sebagai adanya logam yang terkubur di bawah permukaan tanah, warna hijau mengindikasikan nilai pengukuran yang normal dari suatu permukaan tanpa adanya anomali, untuk warna hijau muda diinterpretasikan sebagai daerah karst/gamping kering dan warna hijau tua diinterpretasikan sebagai daerah karst/gamping kering.

Dalam penelitian ini, pencatatan titik koordinat tiap line sudah benar sehingga titik koordinat tidak melenceng dari lokasi sebenarnya, oleh karena itu penentuan lokasi lintasan line pada peta yang dihasilkan dari perangkat lunak *Google Earth* dilakukan secara objektif. Kedua area yang telah disurvei beserta hasil survei ditunjukkan pada Gambar 4.14



Gambar 4.14 Hasil survei kedua area yang di *overlay* dengan peta perangkat lunak *Google Earth*

4.2.2 Analisa Visualisasi 2D

4.2.2.1 Analisa Area 1

Pada area 1 yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 merupakan daerah penelitian pertama yakni daerah bagian sekitar gua yang terbagi lagi menjadi 2 daerah pengambilan data, yakni daerah pengambilan data 1 dan daerah pengambilan data 2. Daerah pengambilan data 1 terdiri dari 3 line yang berada pada bagian atas sedangkan untuk daerah pengambilan data 2 terdiri dari 3 line yang berada pada bagian bawah daerah penelitian 1.

Pada area 1 menunjukkan adanya dominasi pola-pola bewarna hijau yang berarah utara-selatan yang mengindikasikan sebagai daerah yang didominasi oleh timbunan karst/gamping basah dan karst/gamping kering. Selain itu, area 1 juga didominasi oleh pola-pola berwarna biru yang menjalar ke arah utara-selatan yang mengindikasikan sebagai daerah yang didominasi oleh rongga-rongga (*cavities*). Pada area 1 ini juga menunjukkan adanya pola-pola bewarna kuning dan orange kemerah-merahan yang menunjukkan adanya mineralisasi-mineralisasi dan logam-logam kecil yang tertimbun disekitar daerah kering.

4.2.2.2 Analisa Area 2

Pada area 2 yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 merupakan daerah penelitian kedua yakni daerah bagian sekitar *sinkhole*/luweng yang terbagi lagi menjadi 7 daerah pengambilan data, yakni daerah pengambilan data 1, 2, 3, 4, 5, 6 dan 7. Daerah pengambilan data 1, 2 dan 3 masing-masing terdiri dari 3 line kecuali daerah pengambilan data 3 terdiri dari 4 line. Daerah pengambilan data 1, 2 dan 3 berada disebelah utara *sinkhole*/luweng, pada daerah pengambilan data tersebut didominasi oleh pola-pola bewarna hijau yang mengindikasikan sebagai

daerah yang didominasi oleh timbunan karst/gamping basah dan karst/gamping kering. Selain pola-pola bewarna hijau, daerah pengambilan data tersebut juga menunjukkan adanya pola-pola bewarna biru yang menjalar memanjang dari arah *sinkhole*/luweng menuju ke arah utara, sehingga menyerupai saluran bawah permukaan tanah. Pola-pola bewarna biru tersebut mengindikasikan sebagai daerah yang didominasi oleh rongga-rongga (*cavities*). Pada area 2 ini juga menunjukkan adanya pola-pola bewarna kuning dan orange kemerah-merahan yang menunjukkan adanya mineralisasi-mineralisasi dan logam-logam kecil yang tertimbun disekitar daerah kering.

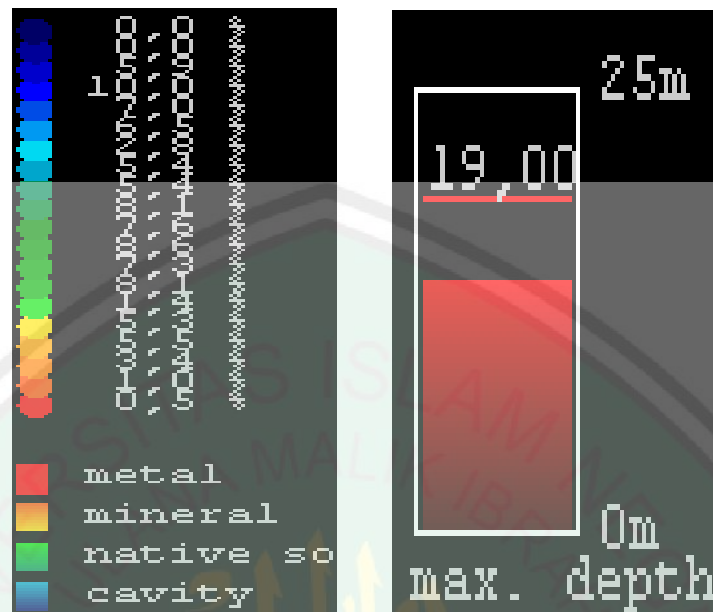
Untuk daerah pengambilan data 4 terdiri dari 4 line. Daerah pengambilan data 4 berada disebelah timur *sinkhole*/luweng, pada daerah pengambilan data tersebut didominasi oleh pola-pola bewarna hijau dan biru, untuk pola-pola bewarna kuning dan orange kemerah-merahan tidak mendominasi pada daerah pengambilan data tersebut. Pola-pola bewarna biru mayoritas berada di area dekat *sinkhole*/luweng yang menjalar ke arah utara-selatan.

Selanjutnya adalah daerah pengambilan data 5, 6 dan 7. Masing-masing daerah pengambilan data tersebut memiliki 2 line. Daerah pengambilan data tersebut berada disebelah selatan *sinkhole*/luweng, banyak terdapat pola-pola bewarna biru yang menyebar seluas daerah pengambilan data tersebut yakni dari arah *sinkhole*/luweng menuju ke arah selatan. Lebih jelasnya bisa dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.14.

4.2.3 Analisa Visualisasi 3D

Pada visualisasi 3D tiap line, baik line yang ada pada area 1 dan line yang ada pada area 2 menunjukkan adanya dua sumbu yakni sumbu horizontal yang merupakan sampling impuls dari pemancar dan sumbu vertikal yang merupakan jarak kedalaman atau waktu tempuh sinyal impuls dari pemancar ke penerima. Semakin konduktif objek yang ditumbu, maka akan semakin jelas sinyal yang ditangkap. Kabel listrik adalah tembaga yang berkonduktivitas sangat baik, sehingga akan memberikan pola yang jelas pada gambar keluaran GPR.

Pada visualisasi 3D seluruh line yang ada pada area survei 1 dan 2 menunjukkan adanya anomali yang ditunjukkan oleh warna biru yang diindikasikan sebagai *cavity area* (daerah rongga), warna merah menunjukkan adanya logam di daerah tersebut, warna kuning menunjukkan daerah tersebut adalah daerah kering sedangkan warna kuning kemerah-merahan menunjukkan adanya mineral pada daerah tersebut, warna hijau cerah menunjukkan daerah tersebut merupakan daerah karst kering dan warna hijau yang agak gelap menunjukkan daerah tersebut merupakan daerah karst basah, untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada lampiran 2 (Data Visualisasi 3D).

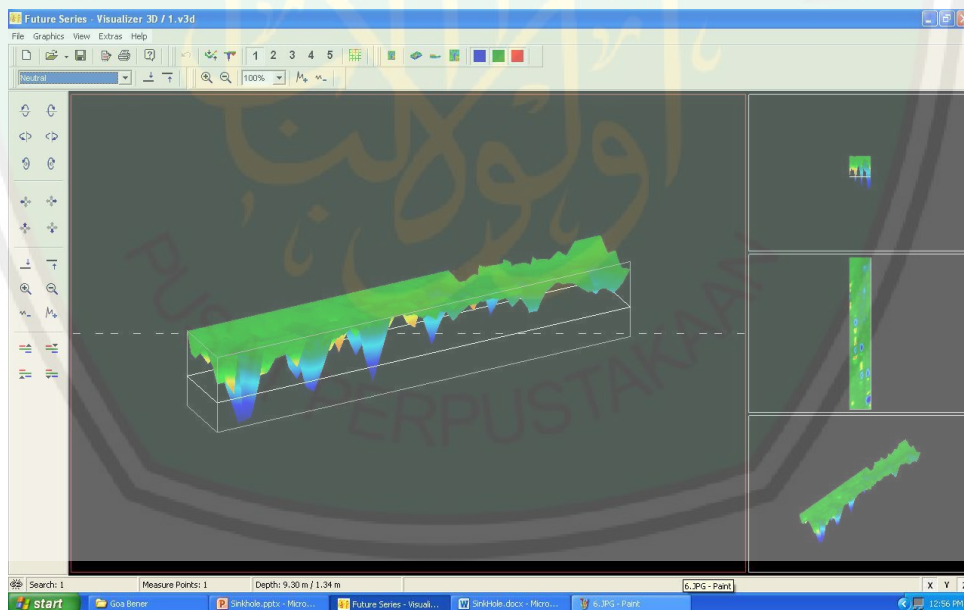


Gambar 4.15 (a) Legenda Pada Output GPR *Future Series* 2005 (b) Skala Kedalaman (Astutik dalam Bahri, 2009)

Skala kedalaman pada gambar 4.15 (b) adalah indikasi kedalaman penetrasi maksimal yang ditunjukkan dengan garis merah. Ketika dalam perlakuan *scanning* kedalaman ini akan terus berubah hingga pemberian impuls selesai. Skala kedalaman akan berubah pada satu nilai konstan yaitu pada jarak terdalam.

Pada legenda GPR *Future Series* 2005 (gambar 4.15 (a)) menunjukkan prosentase distribusi warna, banyaknya warna tidak menunjukkan obyek yang riil, ada kemungkinan pengaruh penjalaran gelombang dan karakteristik material yang ikut berperan. Prosentase distribusi warna memberikan luasan relatif dari obyek. Setiap obyek mempunyai luasan yang bisa dibandingkan dengan obyek-obyek yang lain, jumlah total dari seluruh prosentase material dalam satu *scanning* adalah 100%. Pada legenda GPR *Future Series* 2005, dari atas ke bawah (biru menuju merah) menunjukkan bahwa konduktivitasnya semakin besar dan

resistivitasnya semakin kecil. Sedangkan dari bawah ke atas (merah menuju biru) konduktivitasnya semakin kecil dan resistivitasnya semakin besar. Artinya untuk warna biru memiliki konduktivitas rendah dan resistivitas tinggi karena warna biru mewakili zona *cavity* (area kosong/rongga) sedangkan warna merah mewakili adanya logam sehingga memiliki konduktivitas tinggi dan resistivitas rendah, oleh sebab itu warna biru selalu di atas dan warna merah selalu dibawah. Akan tetapi hal tersebut tidak berlaku pada warna-warna yang ada pada visualisasi 3D, karena pada visualisasi 3D itu menunjukkan kedalaman atau posisi dari kondisi benda yang sebenarnya di lapangan, sehingga warna biru tidak selalu berada di atas dan warna merah tidak selalu berada di bawah.



Gambar 4.16 Output Visualisasi 3D

Pada visualisasi 3D terdapat ruang atau celah kosong artinya kontur 3D tidak penuh karena bukan merupakan representasi bawah permukaan tanah secara 3D, melainkan hanya kedalaman perkiraan parameter fisis yang diukur.

Pada area 1, pola-pola berwarna biru (*zona cavity*) rata-rata memiliki kedalaman sekitar 4,7 meter sampai 10,8 meter pada posisi 1,34 meter dan untuk pola-pola berwarna kuning, orange kemerah-merahan rata-rata memiliki kedalaman sekitar 8,1 meter sampai 12,3 meter pada posisi 1,34 meter. Sedangkan pada area 2, pola-pola berwarna biru (*zona cavity*) rata-rata memiliki kedalaman sekitar 5,4 meter sampai 15,1 meter pada posisi 1,34 meter dan untuk pola-pola berwarna kuning, orange kemerah-merahan rata-rata memiliki kedalaman sekitar 5,5 meter sampai 9,3 meter pada posisi 1,34 meter.

4.2.4 Analisa Pola Saluran Bawah Permukaan

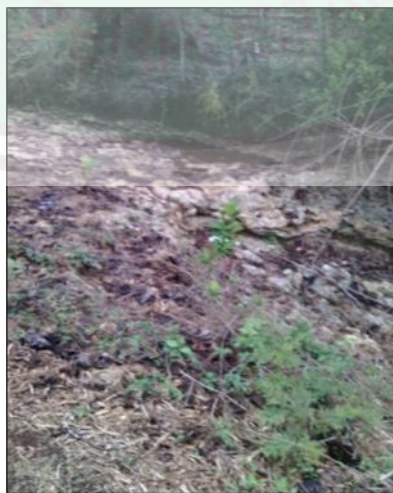
Ditinjau dari Gambar 4.14, pada area 1 didominasi oleh pola-pola berwarna biru yang menjalar ke arah utara-selatan yang mengindikasikan sebagai daerah yang didominasi oleh rongga-rongga (*cavities*). Sedangkan pada area 2, bagian daerah pengambilan data 5, 6 dan 7 yang berada disebelah selatan *sinkhole*/luweng, juga banyak terdapat pola-pola berwarna biru yang menyebar seluas daerah pengambilan data tersebut yakni dari arah *sinkhole*/luweng menuju ke arah selatan.

Pada daerah yang berada paling dekat dengan *sinkhole*/luweng terdapat pola berwarna biru yang cukup luas. Ketika diamati pola tersebut diprediksikan seperti potongan dari saluran bawah permukaan yang menghubungkan antara *sinkhole*/luweng dengan gua. Hal tersebut dikarenakan pada area 1 juga terdapat pola biru yang membentuk seperti saluran bawah permukaan yang mengarah ke arah *sinkhole*/luweng. Akan tetapi prediksi tersebut kurang begitu akurat

dikarenakan antara area 1 dan area 2 terdapat area persawahan tebu yang tidak memungkinkan untuk dilakukannya pengambilan data.

Pada Gambar 4.14 terlihat pola bewarna biru yang berada pada area 1 terputus karena adanya lahan persawahan yang tidak memungkinkan untuk dilakukan pengambilan data, sehingga tidak nampak pola aliran sungai bawah permukaan yang berakibat tidak bisa diprediksikan jika sungai bawah permukaan yang ada pada Gua mengalir menuju ke arah *sinkhole*/luweng.

Pada area 2 terdapat zona *cavity* yang menjalar dari arah selatan ke arah utara. Zona *cavity* tersebut menyerupai saluran bawah permukaan yang diprediksikan dialiri aliran air konat. Setelah melalui *sinkhole*/luweng aliran air konat tersebut selanjutnya diprediksikan masuk pada saluran-saluran kecil yang menjalar ke arah utara *sinkhole*/luweng dan keluar sebagai karst *spring* atau mata air yang kemudian merembes/mengalir ke sungai permukaan yang berada di arah utara *sinkhole*/luweng yang merupakan sambungan atau terusan dari sungai permukaan pada area karst tersebut.



Gambar 4.17 Sungai Permukaan Pada Area Karst di Daerah Sumbermanjing Kulon Kecamatan Pagak Kabupaten Malang

Saluran yang menghubungkan antara gua dan *sinkhole*/luweng maupun saluran-saluran kecil yang menjalar ke arah utara *sinkhole*/luweng, itu semua bukan merupakan zona akuifer yang dapat menyimpan dan mengalirkan airtanah, melainkan hanya zona *cavity* yang diprediksi teraliri aliran air konat, dimana air konat merupakan airtanah yang mengalir melewati rongga-rongga kecil pada struktur gamping, semakin kecil rongganya semakin lambat alirannya. Jika rongganya sangat kecil, akan mengakibatkan molekul air akan tetap tinggal, karena molekul air tersebut terperangkap/terjebak dalam rongga-rongga (zona *cavity*) tersebut. Airtanah yang terjebak itulah yang dinamakan air konat.

Pembagian sistem akuifer dan airtanah di kawasan karst, yaitu:

5. Akuifer tertekan (*Confined Aquifer*) merupakan suatu jenis akuifer yang bagian atas dan bawahnya dibatasi oleh lapisan bersifat kedap air akifug atau akiklud.
6. Akuifer bebas (*Unconfined Aquifer*) merupakan suatu jenis akuifer yang dibatasi oleh 1 lapisan impermeabel di bagian bawahnya dan pada bagian atasnya tidak ada lapisan penutup/impermeabel layer.
7. Akuifer semi (*Semi-confined Aquifer*) merupakan suatu jenis akuifer yang dibatasi oleh lapisan semi permeabel/lapisan akitard (di atas dan atau di bawahnya).
8. Akuifer melayang (*Perched Aquifer*) merupakan suatu jenis akuifer berupa bentuk lensa-lensa batuan yang dibatasi oleh lapisan impermeable (di atas dan di bawahnya).

4.2.5 Analisa Daerah Rawan Timbulnya *Sinkhole*/Luweng Baru

Pada Gambar 4.14 bisa dilihat bahwa daerah yang diprediksi sebagai zona rawan amblesan tanah atau daerah yang rawan akan timbulnya bencana *sinkhole*/luweng baru adalah daerah pengambilan data 5, 6 dan 7 yang berada disebelah selatan *sinkhole*/luweng, karena daerah tersebut banyak terdapat pola-pola bewarna biru yang menyebar rata seluas daerah pengambilan data tersebut yakni dari arah *sinkhole*/luweng menuju ke arah selatan. Dimana daerah sebelah selatan tersebut adalah daerah persawahan yang mengarah ke arah perumahan warga.

Pola-pola bewarna biru yang diindikasikan sebagai zona *cavity* (rongga) tersebut lama kelamaan akan semakin luas karena beberapa faktor, diantaranya adalah proses karstifikasi. Proses karstifikasi ini akan menjadikan batugamping atau karst menjadi rapuh dan melarut sehingga rongga-rongga tersebut lama-kelamaan akan semakin lebar dan menjalar rata. Ketika rongga-rongga tersebut telah melebar dan saling berkaitan satu dengan yang lain maka akan memicu timbulnya bencana *sinkhole*/luweng baru di daerah sebelah selatan *sinkhole*/luweng tersebut selain itu terbentuknya *sinkhole*/luweng juga bisa dipengaruhi oleh tektonik dan gerakan tanah, dimana daerah Pagak kabupaten Malang bagian selatan ini memiliki potensi gempabumi yang cukup besar.



Gambar 4.18 Daerah yang Diprediksi Rawan Akan Timbulnya Bencana *Sinkhole*/Luweng Baru Berdasarkan Intepretasi Data GPR *Future Series* 2005

4.2.6 Upaya Mitigasi Dini Timbulnya Bencana *Sinkhole*/Luweng Baru

Setelah mengetahui kondisi bawah permukaan daerah survei dan mengetahui bawah daerah yang berpotensi timbulnya bencana *sinkhole*/luweng baru adalah daerah persawahan yang mengarah ke arah perumahan warga maka perlu dilakukan upaya mitigasi dini tahap berikutnya, yakni dengan cara melakukan pengolahan dan pelestarian kawasan karst atau gamping.

Strategi pengelolaan sumberdaya alam kawasan karst ditujukan untuk mencapai fungsi saintifik, ekonomi dan sosial budaya harus memperhatikan empat aspek, yaitu:

5. Perubahan, yang mencakup perubahan lingkungan, sosial, sistem ekonomi dan sistem politik.
6. Kompleksitas, kawasan karst mempunyai kompleksitas yang tinggi, sehingga dampak aktifitas manusia selalu kompleks dan tidak semua dapat diprediksi.

7. Ketidakpastian, lingkungan secara totalitas itu merupakan satu sistem, sehingga lingkungan penuh ketidakpastian dan dalam mengambil keputusan untuk mengelola sumberdaya alam harus hati-hati.
8. Konflik, dalam pengalokasian sumberdaya alam kebanyakan menimbulkan konflik, yang terefleksikan pada perbedaan pandangan, ideologi, dan harapan.

Pengelolaan sumberdaya alam pada kawasan karst harus didasari oleh asas dan strategi yang tepat. Pola yang perlu dianut dalam pengelolaan sumberdaya kawasan karst untuk tujuan ekonomi harus memperhatikan azas konservasi dan azas efisiensi antara lain adalah:

7. Mengutamakan pengelolaan sumberdaya alam yang dapat diperbaharui.
8. Menghemat sumber alam yang langka.
9. Memelihara kemampuan sumberdaya alam untuk menopang pembangunan yang berazaskan keberlanjutan.
10. Mengembangkan rencana penggunaan dan tata ruang yang baik.
11. Merehabilitasi kerusakan sumberdaya alam yang telah terjadi.
12. Memberi nilai kelangkaan terhadap sumberdaya alam yang langka dan memberikan prioritas untuk penyelamatan dan perlindungan.

Pelestarian kawasan karst dilakukan dalam bentuk perlindungan fungsi kawasan karst diantaranya dengan inventarisasi/penelitian, penataan kawasan, rehabilitasi, dan pemberdayaan masyarakat penghuni karst.

4. Inventarisasi dan penelitian diharapkan mampu memberikan informasi karakteristik dan variasi karst di daerah Sumbermanjing Kulon Kecamatan Pagak Kabupaten Malang.
5. Penataan ruang/kawasan dimaksudkan untuk mengalokasikan lahan di kawasan berbatuan karbonat sesuai dengan potensinya.
6. Rehabilitasi pada dasarnya mengembalikan siklus atau proses alam kembali atau mendekati keadaan semula atau alamiah.

Fungsi dari kawasan karst adalah sebagai berikut:

6. Habitat aneka spesies flora dan fauna yang memiliki nilai endemik tinggi karena kawasan karst merupakan ekosistem yang unik, sehingga memperkaya khasanah keanekaragaman hayati.
7. Fungsi hidrologi atau tata air. Permukaan kawasan karst berfungsi sebagai tandon penampung air yang besar untuk suplai air ke seluruh kawasan tersebut.
8. Fungsi wisata. Kawasan karst memiliki kondisi fisiografi atau bentang alam yang unik dan langka.
9. Fungsi pelestarian sejarah (situs arkeologi). Sering ditemukannya fosil manusia di kawasan karst seperti di dinding-dinding gua.
10. Fungsi penelitian. Lingkungan biotik dan abiotik kawasan karst merupakan situs penting bagi pengembangan pengetahuan, baik yang berbasis ilmu kebumian (geologi, geomorfologi, paleontologi), ekologi, biologi, kehutanan, pertanian, peternakan, maupun sosial dan budaya.

4.2.7 Integrasi Geologi Daerah Karst/Gamping dengan Al-Qur'an dan Hadist

Al-Qur'an sebagai landasan kehidupan manusia merupakan sebuah kitab yang sempurna, yang di dalamnya menjelaskan hampir seluruh perihal kehidupan manusia. Akan tetapi dalam sejumlah ayat Al-Qur'an juga banyak terdapat penjelasan mengenai fakta ilmiah yang bisa membuktikan kebenaran ilmiah yang baru bisa terungkap dengan teknologi abad ke-20. Hal ini sebagai bukti kebesaran Allah SWT dan sebagai petunjuk kepada manusia dalam pemenuhan segala hajat hidupnya di dunia.

Selain itu sejumlah ayat Al-Qur'an juga memberikan indikasi tentang jagat raya dengan segala bagian-bagiannya (langit, bumi, segala benda mati dan makhluk hidup yang ada, serta berbagai fenomena jagat raya). Isyarat-isyarat itu menunjukkan bukti (*istidlal*) atas kekuasaan Allah yang tidak terbatas, ilmu dan hikmah (kebijaksanaan) Nya yang sangat sempurna dalam menciptakan jagat raya ini. Itu semua sebagai *hujjah* (argumentasi) terhadap orang-orang kafir, musyrik dan kaum skeptis, sekaligus untuk mengukuhkan hakikat *uluhiyah* Allah, Rabb alam semesta.

Bumi di dalamnya terdapat berbagai lapisan. Beberapa diantaranya meleleh atau cair. Jika bumi dipotong, maka akan terlihat tiga lapisan utama, yaitu kerak, mantel dan inti. Ilmu yang mempelajari bumi secara mendasar adalah ilmu *geologi*. Geologi berasal dari kata Yunani *geo* yang artinya bumi dan *logos* artinya pengetahuan.

Allah SWT berfirman dalam Surat An-Naml ayat 61:

أَمَّنْ جَعَلَ الْأَرْضَ قَرَارًا وَجَعَلَ خِلَالَهَا أَنْهَارًا وَجَعَلَ لَهَا رَوَاسِيَ وَجَعَلَ بَيْنَ الْبَحْرَيْنِ حَاجِزًا ۗ أَلَيْسَ اللَّهُ بِأَكْثَرُهُمْ لَا يَعْلَمُونَ ﴿٦١﴾

“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).

Ayat sebelum ini berbicara tentang penciptaan langit dan bumi serta beberapa hal yang berkaitan dengan keduanya, seperti hujan dari langit dan tumbuhan di bumi. Kini, dibicarakan secara khusus apa yang di bumi, karena ini lebih jelas dapat terlihat. Ayat di atas masih melanjutkan “perbandingan” sebelumnya dengan menyatakan: “apakah berhala-berhala yang kami sembah lebih baik atau apakah siapa, yakni apakah Dia yaitu Allah, yang telah menjadikan bumi mantap, yakni memiliki kemantapan sehingga tidak guncang dan apa yang berada di permukaanya pun tidak berguncang. Dan yang menjadikan celah-celahnya antara gunung-gunung yang tertancap di bumi itu sungai-sungai dan yang menjadikan untuknya, yakni bumi itu, gunung-gunung yang kukuh sehingga bumi tidak guncang dan menjadikan pula antara dua laut, yakni antara sungai dan laut, pemisah sehingga air laut dan sungai tidak bercampur? apakah sembah-sembahan kamu lebih baik dari pada Allah? Pasti tidak. Apakah disamping Allah ada tuhan yang lain? Sungguh tidak ada bahkan yang sebenarnya kebanyakan dari mereka yang menyembah selain Allah atau

mempersekutukannya kendati mereka memanfaatkan ciptaan-Nya kebanyakan dari mereka tidak mengetahui (Shihab, 2002).

Kata (فَرَّارًا) terambil dari kata (قَرَّ) *qarra* yang berarti mantap tenang tidak guncang. Di sini, Allah mengajak manusia bersyukur, sekaligus berpikir tentang keajaiban ciptaan-Nya. Betapa tidak menakjubkan, setiap saat bumi bergerak bagaikan berenang di angkasa, namun penghuninya yang ada dipermukaanya tidak merasakan gerak itu, bahkan tidak terjatuh dan tergelincir (Shihab, 2002).

Dalam QS. An-Nazi'at ayat 30-33 juga dijelaskan masalah geologi bumi, yang berbunyi:

وَالْأَرْضُ بَعْدَ ذَلِكَ دَحَاهَا ﴿٣٠﴾ أَخْرَجَ مِنْهَا مَاءَهَا وَمَرْعَاهَا ﴿٣١﴾ وَالْجِبَالُ أَرْسَاهَا ﴿٣٢﴾ مَتَاعًا لَّكُمْ وَلِأَنْعَمِكُمْ ﴿٣٣﴾

“Dan bumi sesudah itu dihamparkan-Nya, Ia memancarkan dari padanya mata airnya, dan (menumbuhkan) tumbuh-tumbuhannya, Dan gunung-gunung dipancang-Nya dengan teguh, (semua itu) untuk kesenanganmu dan untuk binatang-binatang ternakmu” (QS. An-Nazi'at: 30-33).

Maksudnya Dia hamparkan bumi, lalu Dia pancarkan mata airnya serta munculkan segala yang dikandungnya dan Dia alirkan sungai-sungainya, serta tumbuhkan tanaman, pepohonan, dan buah-buahannya, juga Dia tegakkan gunung-gunungnya agar penghuninya menetap dengan tenang. Semua itu merupakan kenikmatan bagi semua makhluk-Nya dan karena mereka memang membutuhkan berbagai binatang ternak yang dapat mereka makan dan pergunakan untuk kendaraan selama mereka butuhkan didunia ini sampai berakhir masa dan waktu yang telah ditentukan (Abdul, 2008).

Dengan kata lain, dalam penegakan gunung-gunung, gunung-gunung mencengkeram lempengan-lempengan kerak bumi dengan memanjang ke atas dan ke bawah permukaan bumi pada titik-titik pertemuan lempengan-lempengan ini. Dengan cara ini, mereka memancangkan kerak bumi dan mencegahnya dari terombang-ambing di atas lapisan magma atau di antara lempengan-lempengannya. Singkatnya, kita dapat mengumpamakan gunung dengan paku yang menyatukan bilah-bilah papan.

Jika dua lempeng saling bertumbukan, kerak bumi akan terdorong ke atas dan membentuk barisan pegunungan tinggi, disebut pegunungan lipatan.

Dari penjelasan ayat-ayat Al-Qur'an di atas dapat ditarik garis merah bahwa Allah SWT menciptakan bumi seisinya ini agar semua makhluk-Nya bisa menetap dengan tenang serta bisa memanfaatkan dengan baik segala kenikmatan yang diberikan-Nya sebagai bentuk rasa syukur atas ciptaan Allah tersebut. Berikut hadist yang mendukung penjelasan ayat-ayat Al-Qur'an tersebut:

مَثَلُ مَا بَعَثَنِي اللَّهُ بِهِ مِنَ الْهُدَى وَالْعِلْمِ كَمَثَلِ غَيْثٍ أَصَابَ أَرْضًا فَكَانَتْ مِنْهَا طَائِفَةٌ طَيِّبَةٌ قَبِلَتِ الْمَاءَ، فَأَنْبَتَتِ الْكَلَّاءَ وَالْعُشْبَ الْكَثِيرَ، وَكَانَ مِنْهَا أَجَادِبُ أَمْسَكَتِ الْمَاءَ، فَفَعَّ اللَّهُ بِهَا النَّاسَ فَشَرِبُوا مِنْهَا وَسَقَوْا وَزَرَعُوا، وَأَصَابَ طَائِفَةٌ مِنْهَا أُخْرَى إِنَّمَا هِيَ قَيْعَانٌ لَا تُمْسِكُ مَاءً وَلَا تُنْبِتُ كَلًّا؛ فَذَلِكَ مَثَلُ مَنْ فَقَّهَ فِي دِينِ اللَّهِ وَنَفَعَهُ مَا بَعَثَنِي اللَّهُ بِهِ فَعَلِمَ وَعَلِمَ، وَمَثَلُ مَنْ لَمْ يَرْفَعْ بِذَلِكَ رَأْسًا وَلَمْ يَقْبَلْ هُدَى اللَّهِ الَّذِي أُرْسِلْتُ بِهِ

“Dari Abi Musa R.A, dia berkata Nabi SAW bersabda, “Perumpamaan petunjuk dan ilmu pengetahuan, yang oleh karena itu Allah mengutus aku untuk menyampaikannya, seperti hujan lebat jatuh ke bumi; bumi itu ada yang subur, menyerap air, menumbuhkan tumbuh-tumbuhan dan rumput-rumput yang banyak. Ada pula yang keras tidak menyerap air sehingga tergenang, maka Allah memberi manfaat dengan hal itu kepada manusia. Mereka dapat minum dan memberi minum (binatang ternak dan sebagainya), dan untuk bercocok tanam.

Ada pula hujan yang jatuh kebagian lain, yaitu di atas tanah yang tidak mengenangkan air dan tidak pula menumbuhkan rumput. Begitulah perumpamaan orang yang belajar agama, yang mau memanfaatkan sesuatu yang oleh karena itu Allah mengutus aku menyampaikannya, dipelajarinya dan diajarkannya. Begitu pula perumpamaan orang yang tidak mau memikirkan dan mengambil peduli dengan petunjuk Allah, yang aku diutus untuk menyampaikannya. “Abu Abdillah berkata, bahwa Ishaq berkata,” Dan ada diantara bagian bumi yang digenangi air, tapi tidak menyerap” (متقن عليه).

Alloh SWT menciptakan kawasan/daerah berstruktur gamping (karst) lengkap dengan kondisi geologinya yang menawan juga memiliki maksud dan tujuan. Kondisi geologi karst yang identik dengan gua-gua bawah permukaan yang dihiasi dengan aliran-aliran sungai bawah permukaan yang nantinya akan menjadi sumber mata air yang sangat bermanfaat bagi kehidupan makhluk-Nya tidaklah luput dari sifat kemurahan sang kholik terhadap kholifahnya. Belum lagi dengan kesuburan tanah pada kawasan karst yang merupakan nikmat Alloh yang patut disyukuri karena dengan kondisi tanah yang subur segala jenis tumbuhan yang berguna bagi kehidupan manusia akan tumbuh subur pada kawasan tersebut. Melihat nikmat Alloh yang tiada tara tersebut maka dihimbau bagi seluruh makhluk penghuni muka bumi ini terkhusus penghuni kawasan karst agar mau melestarikan kawasan karst yang mudah rusak tersebut karena kawasan karst tersebut memiliki potensi sumberdaya alam yang luar biasa untuk dikembangkan. Hal tersebut didukung oleh salah satu hadist yang berbunyi:

الرَّاحِمُونَ يَرْحَمُهُمُ الرَّحْمَانُ، اِرْحَمُوا مَنْ فِي الْأَرْضِ يَرْحَمْكُمْ مَنْ فِي السَّمَاءِ

“Para pengasih dan penyayang dikasihi dan di sayang 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).

Adanya kawasan karst adalah salah satu lambang dari kekuasaan Allah yang tak terbatas, ketika ciptaan Allah tersebut dirusak oleh tangan-tangan manusia yang tidak bertanggungjawab maka bencana alam pun akan muncul sebagai konsekuensi ulah manusia tersebut. Bencana alam yang sering terjadi pada kawasan karst adalah bencana alam tanah longsor dan amblesan tanah (Sinkhole/Luweng).

Allah SWT berfirman dalam QS. Asy-Syuura: 30 yang berbunyi:

وَمَا أَصَابَكُمْ مِّنْ مُّصِيبَةٍ فَبِمَا كَسَبَتْ أَيْدِيكُمْ وَيَعْفُوا عَنْ كَثِيرٍ ﴿٣٠﴾

“Dan apa saja musibah yang menimpa kamu Maka adalah disebabkan oleh perbuatan tanganmu sendiri dan Allah memaafkan sebagian besar (dari kesalahan-kesalahanmu)” (QS. Asy-Syuura: 30).

Ayat di atas menyebutkan bahwa bencana atau musibah yang terjadi adalah karena ulah tangan manusia sendiri. Tingkah laku/ulah manusia itu ada beberapa jenis, salah satunya adalah ulah manusia secara fisik yang dijelaskan Allah dalam QS. Ar-Ruum: 41

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ﴿٤١﴾

“Telah nampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan karena perbuatan tangan manusia supaya Allah merasakan kepada mereka sebagian dari (akibat) perbuatan mereka, agar mereka kembali (ke jalan yang benar)” (QS. Ar-Ruum: 41).

Ayat di atas sudah sangat jelas bahwa timbulnya kerusakan di darat dan di laut adalah karena ulah tangan manusia sendiri. Contoh umumnya itu seperti

kerusakan kawasan karst akibat penambang gamping yang tidak bertanggungjawab dan eksploitasi airtanah yang berlebihan sehingga menjadikan bencana alam seperti tanah longsor dan amblesan tanah (*sinkhole/luweng*) yang sangat berbahaya dan merugikan bagi manusia.

Kemudian menurut esensinya, bencana yang terdapat dalam al-Qur'an setidaknya memiliki dua fungsi. Adapun fungsi yang pertama adalah 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 berlangsung, baik di dunia maupun di akhirat.

Sebagai seorang muslim yang bertaqwa serta beriman kepada Alloh S.W.T hendaknya bisa mengambil hikmah dari adanya suatu bencana alam yang terjadi. Selain itu juga memiliki sikap peduli akan keadaan alam, hal tersebut bisa dibuktikan dengan melakukan upaya atau usaha sebagai mitigasi dini timbulnya bencana alam yakni dengan melakukan riset atau penelitian-penelitian yang berguna bagi pelestarian alam agar timbulnya bencana alam bisa dicegah.

Diriwayatkan dari Jabir berkata:

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم : المؤمن يألف ويؤلف ، ولا خير فيمن لا يألف ، ولا يؤلف، وخير الناس أنفعهم للناس

Diriwayatkan dari Jabir berkata, "Rasulullah saw bersabda, 'Orang beriman itu bersikap ramah dan tidak ada kebaikan bagi seorang yang tidak bersikap ramah. Dan sebaik-baik manusia adalah orang yang paling bermanfaat bagi manusia.'" (HR. Thabrani dan Daruquthni).

Hadist di atas menunjukan bahwa Rasulullah menganjurkan umat islam selalau berbuat baik terhadap orang lain dan mahluk yang lain. Hal ini menjadi indikator bagaimana menjadi mukmin yang sebenarnya. Eksistensi manusia sebenarnya ditentukan oleh kemanfataannya pada yang lain. Adakah dia berguna bagi orang lain, atau malah sebaliknya menjadi parasit buat yang lainnya.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil survei, pengolahan dan interpretasi data yang dilakukan dengan metode *Ground Penetrating Radar (GPR) Future Series 2005* di daerah Sumbermanjing Kulon dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Berdasarkan hasil dari interpretasi secara kualitatif yang mengacu pada visualisasi 2D menunjukkan bahwa pada gua-gua bawah tanah di daerah penelitian tidak nampak adanya zona akuifer melainkan hanya zona *cavity* (rongga-rongga) yang diduga sebagai salah satu penyebab adanya potensi terjadinya amblesan tanah berupa luweng/*sinkhole*.
2. Berdasarkan hasil dari interpretasi secara kualitatif yang mengacu pada visualisasi 2D menunjukkan bahwa daerah yang diprediksi sebagai zona rawan amblesan tanah atau daerah yang rawan akan timbulnya bencana *sinkhole*/luweng baru adalah daerah pengambilan data 5, 6 dan 7 yang berada disebelah selatan *sinkhole*/luweng, tepatnya pada area survei 2 karena pada daerah tersebut banyak terdapat pola-pola bewarna biru yang mengindikasikan sebagai rongga-rongga bawah permukaan yang menyebar rata seluas daerah pengambilan data tersebut yakni dari arah *sinkhole*/luweng menuju ke arah selatan. Dimana daerah sebelah selatan tersebut adalah daerah persawahan yang mengarah ke arah perumahan warga.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk dilakukan survei dengan metode yang berbeda untuk mengetahui sistem akuifer kawasan karst dan mengetahui hubungan antara pembentukan *sinkhole*/luweng dengan rongga-rongga bawah permukaan secara mendetail.



DAFTAR PUSTAKA

- Abelson, M., Bear, G., Shtivelmann, V., Wachs, D., Raz, E., Crouvi, O., Kurzon, I., Yechieli, Y. 2003. *Collapse sinkholes and radar interferometry reveal neotectonics concealed within the Dead sea basin*. Geophysical Research Letters 30, 1545.
- Al-Atsari, Abu ihsan dan M. Abdul Ghoffar E.M. 2008. *Tafsir Ibnu Katsir*. Pustaka Imam Asy-Syafi'i.
- Al-Zoubi, et.al. 2007. *Use Of 2D Multy Electrodes Resistivity Imagining For Sinkholes Hazard assessment along the eastern part of the Dead Sea, Jordan*. American Journal Of Environmental Sciences 3, 299-233.
- Anita Y, dkk. 2012. *Pengaruh Lempung Ekspansif Terhadap Potensi Amblesan Tanah di Daerah Semarang*. Riset Geologi dan Pertambangan Vol. 22 No. 2, 93-104.
- Astutik S. 1997. *Penggunaan Ground Penetrating Radar (GPR) Sebagai Metal Detector*. Jurnal ILMU DASAR, Vol.2 No. 1 : 9-16, MALA GeoScience.
- Bahri S. Ayi. 2009. *Penentuan Karakteristik Dinding Gua Seropan Gunungkidul dengan Metode Ground Penetrating Radar*. Surabaya: ITS.
- Brinkmann, R., Parise, M., Dye, D. 2008. *Sinkhole Distribution in a rapidly developing urban environment: Hillsborough country*. Engineering Geo, Tampa Bay area, Florida.
- Eko Haryono. 2001. Nilai Hidrologi Bukit Karst. *Seminar Nasional Eko-Hidrolik*. Yogyakarta 28-29 Maret 2001. Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada.
- Eko Haryono. 2004. Geomorfologi Karst, dalam Eko Haryono dan Tjahyo Nugroho Adji (ed). 2004. *Pengantar Geomorfologi dan Hidrologi Karst*. Yogyakarta: Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.
- Eko Haryono. 2011. *Atmospheric Carbon Dioxide Sequestration Trough Karst Denudation Proseses*. Artikel. Proceedings Asian Trans-Disciplinary Karst Conference.
- Ford, D dan William, P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Sussex: John Wiley and Sons.
- Frumkin, A., Karkanas, P., Bar-Mattews, M., Barker, R., Gopher, A., Shahack-Gross, R., Vaks, A. 2009a. *Gravitational deformations and fillings of aging caves: the example of Qesem karst system*. Israel. Geomorphology 106, 154-164.

- Gutiérrez, F. 2009. *Hazards associated with karst*. In : Alcántara, I., Goudie., A. (Eds), *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention*. Cambridge. pp. 161-175. Cambridge University Press.
- Handayani, Astri. 2009. *Analisis Potensi Sungai Bawah Tanah di Gua Seropan dan Gua Semuluh*. Surakarta: UNS.
- Klimchouk, A. 2005. *Subsidence Hazards in different types of karst : evolutionary and speleogenetic approach*. *Environmental Geology* 31, 42-49.
- Muhyi, Sumarsono. *Deteksi Kabel Listrik Bawah Tanah dengan Otomata*. Jakarta: STMIK Indonesia.
- Mukna S. Heddy. 2009. *Potensi Wisata Kawasan Karst, Asdep Pengendalian Kerusakan Hutan dan Lahan*. Kementrian Negara Lingkungan Hidup.
- Nuraini, Fahad. 2012. *Kajian Karakteristik Dan Potensi Kawasan Karst Untuk Pengembangan Ekowisata Di Kecamatan Ponjong Kabupaten Gunungkidul*, Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Parise, M., De Waele, J., Gutiérrez, F. 2009. *Current Perspectives on the environmental impacts and hazards in karst*. *Environmental Geology* 58, 235-237.
- Paulus. 2012. *Pemodelan 3D Cavity Daerah "X" Dengan Menggunakan Metode Resistivity konfigurasi Dipole-Dipole*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Rahmawan. 2014. *Survei Elektromagnetik Ground Penetrating Radar*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Santosa, D., dkk. 2004. *Time Lapse vertical Gradient Microgravity Measurement for Subsurface Mass Change and Vertical Ground Movement (Amblesan) Identification, Case Study : Semarang Alluvial Plain, Central Java, Indonesia*. Japan. SEGJ International Symposium.
- Shihab, M. Quraish. 2002. *Tafsir Al Misbah*. Jakarta: Lentera Hati.
- Supriyanto. 2007. *Perambatan Gelombang Elektromagnetik*. Jakarta: Fisika-FMIPA Universitas Indonesia.
- Suratman Worosuprojo, Eko Haryono, dan Mufti Latif Ahmad. 2000. *Kajian Inventarisasi Potensi Kawasan Karst di Kabupaten Bantul*. Laporan Penelitian. BAPEDA DIY-Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.
- 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. PLSM UNS. Surakarta 11 November 2000.

Sutikno. 1997. *Geomorfologi sebagai Dasar Perlindungan dan Pencagaran Kawasan Karst*. Makalah Seminar Hidrologi Pengelolaan Kawasan Karst. Yogyakarta 25-26 Oktober 1997. MAKARTI Fakultas Geografi UGM.

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.

Tjahyo Nugroho Adji. 2004. Hidrologi Karst, dalam Eko Haryono dan Tjahyo Nugroho Adji (ed). 2004. *Pengantar Geomorfologi dan Hidrologi Karst*. Yogyakarta: Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.

Uswahtun, Hasanah. 2015. *Aplikasi Metode Ground Penetrating Radar Untuk Mitigasi Dini Bencana Longsor di Dusun Nglumpang, Desa Pangkal, Kecamatan Sawoo, Kabupaten Ponorogo*. Malang: Fisika-FMIPA UM.

Waltham, A.C., Bell, F.G., Chulsaw, M.G. 2005. *Sinkholes and Subsidence; Karst and cavernous rocks in engineering and construction*. UK, Praxis, Springer, Chichester.

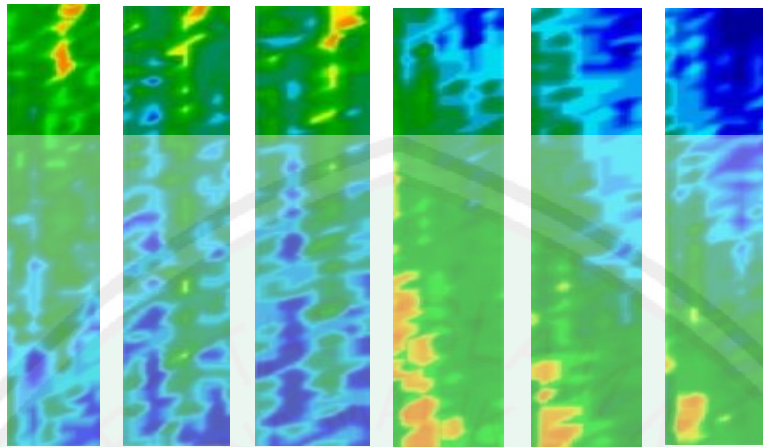
Widada, Sugeng. 2007. *Gejala Instrusi Air Laut di Daerah Pantai Pekalongan*. Jurnal Geologi Vol. 12 (1) : 45-52. Semarang: Ilmu Kelautan Undip.



LAMPIRAN

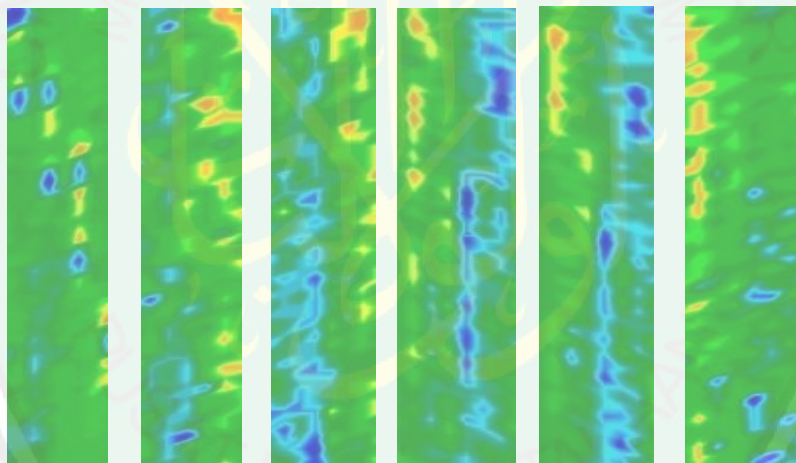
Lampiran 1 Data Visualisasi 2D

1. Area 1 (Sekitar Gua)

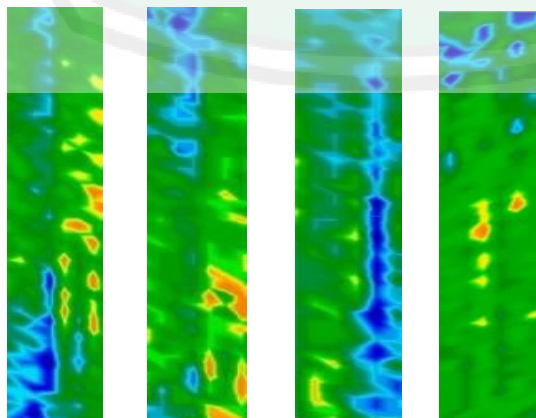


Line 1 Line 2 Line 3 Line 4 Line 5 Line 6

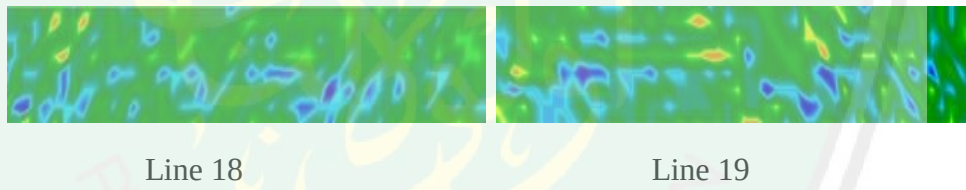
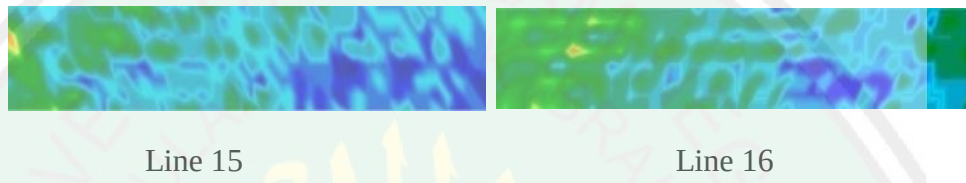
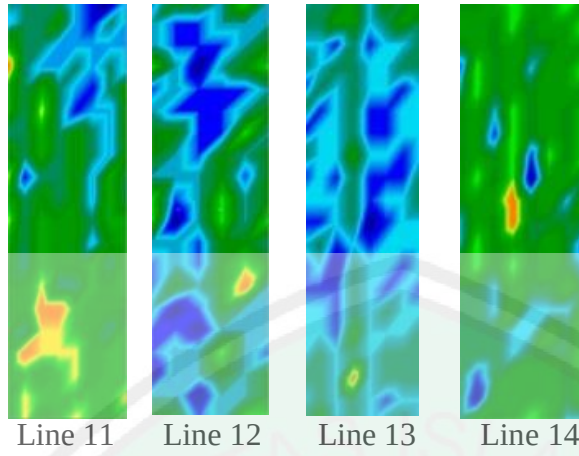
2. Area 2 (Sekitar Sinkhole/Luweng)



Line 1 Line 2 Line 3 Line 4 Line 5 Line 6

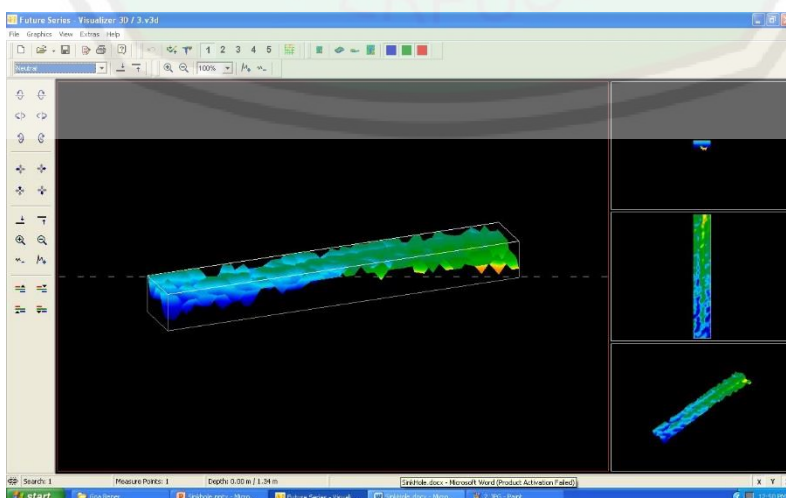
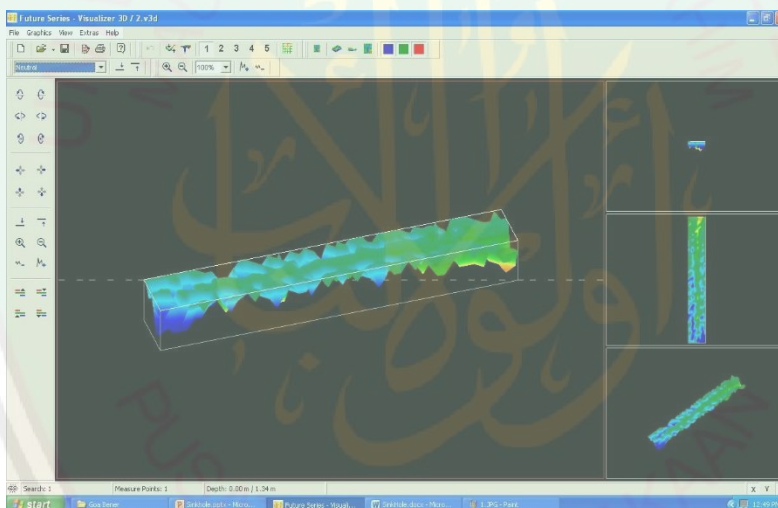
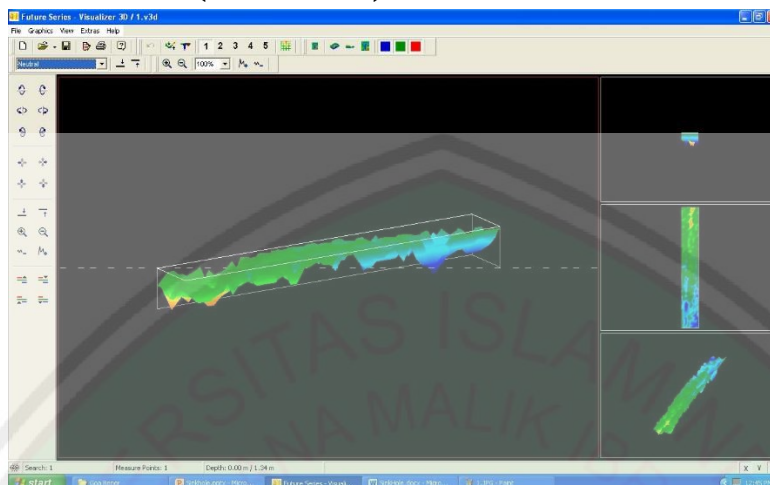


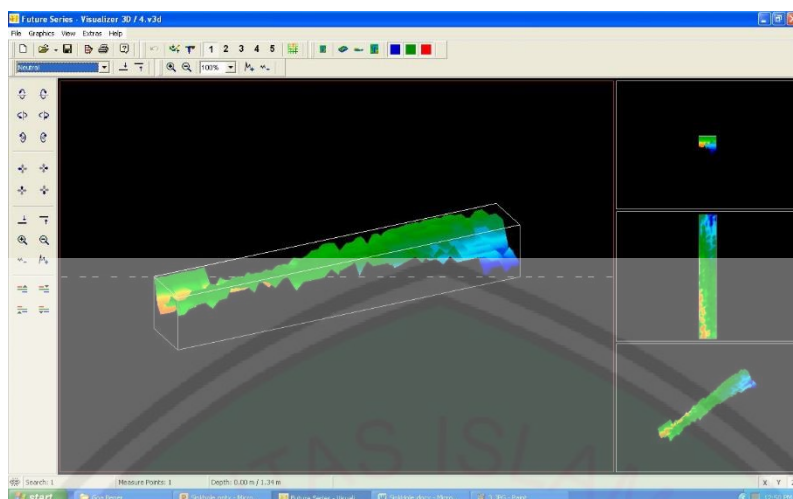
Line 7 Line 8 Line 9 Line 10



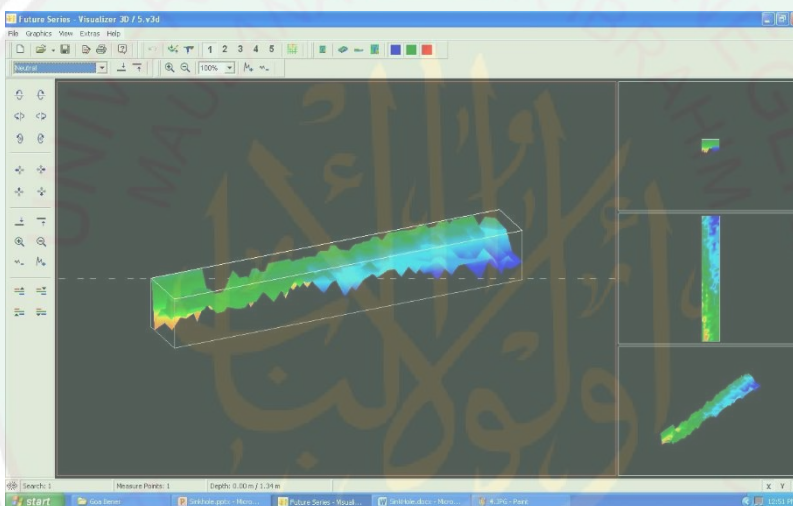
Lampiran 2 Data Visualisasi 3D

1. Area 1 (Sekitar Gua)

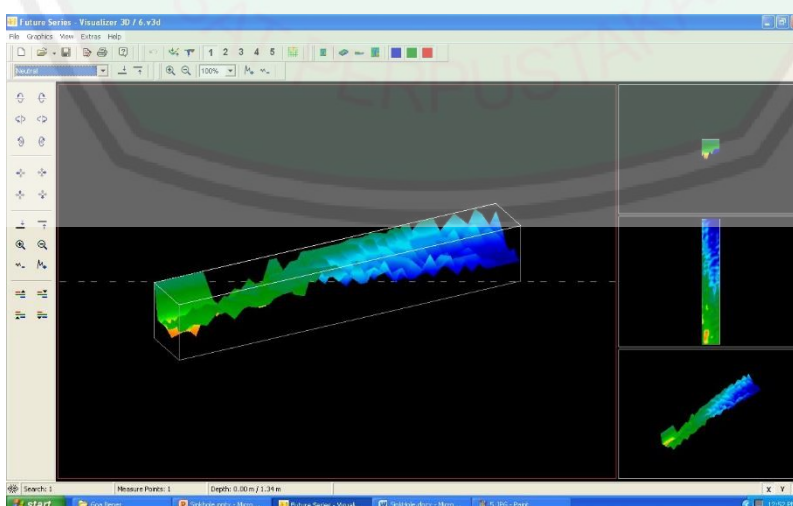




Line 4

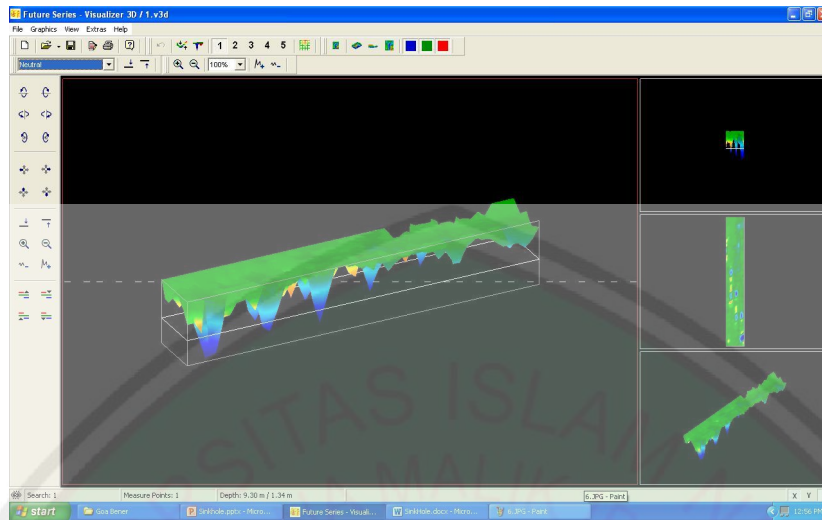


Line 5

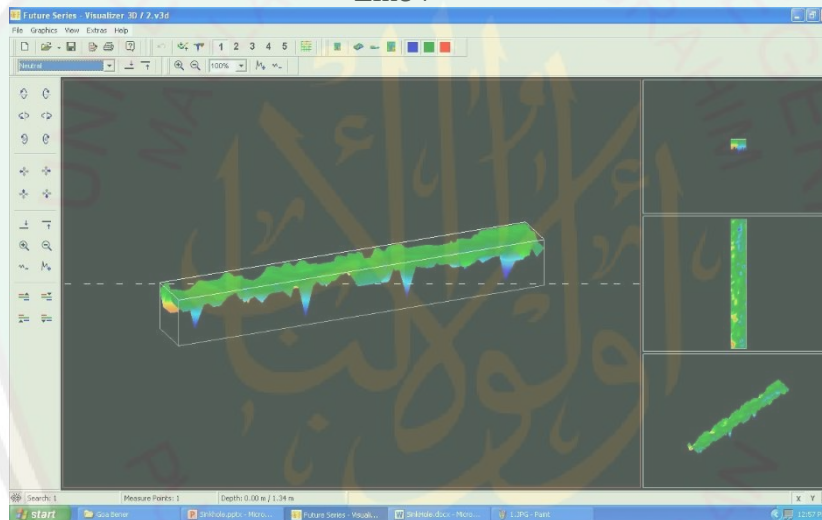


Line 6

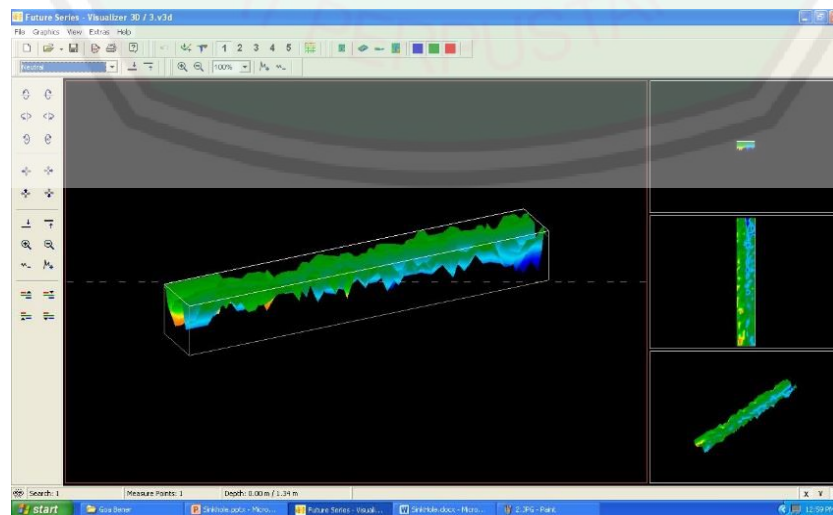
2. Area 2 (Sekitar Sinkhole/Luweng)



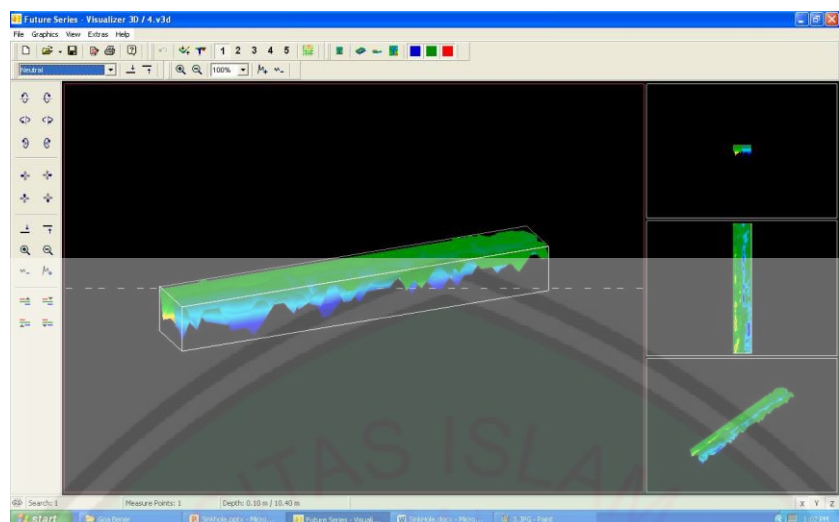
Line 7



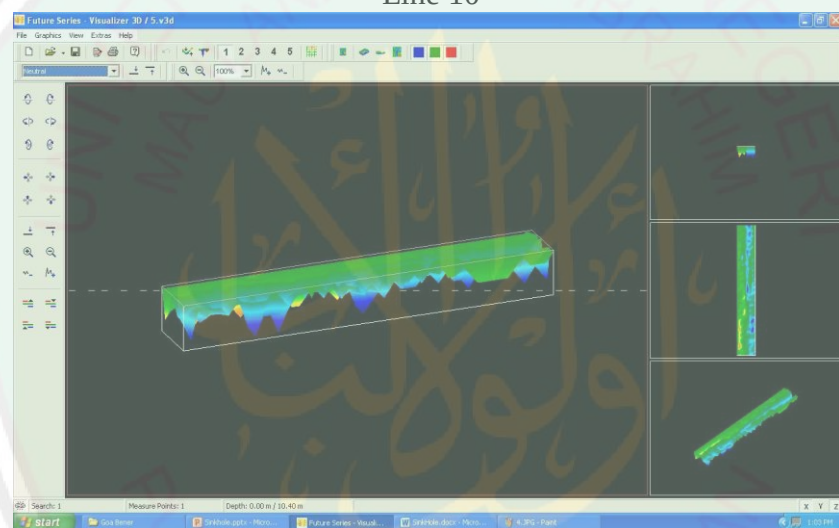
Line 8



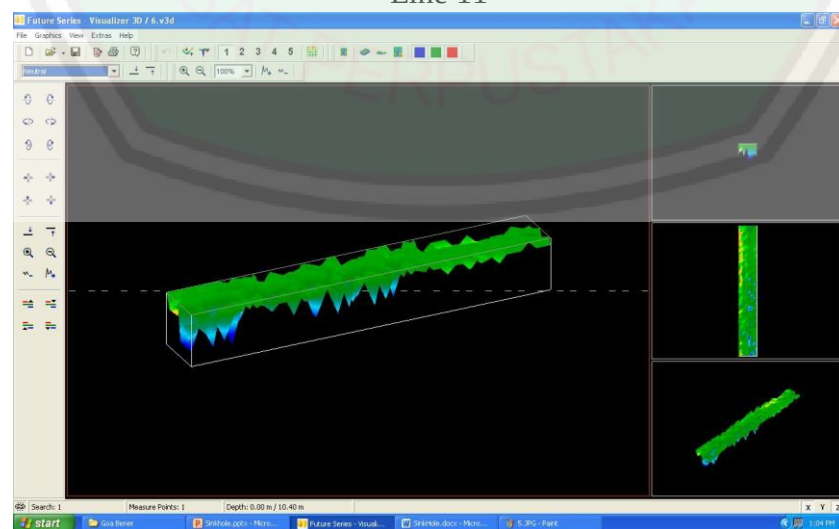
Line 9



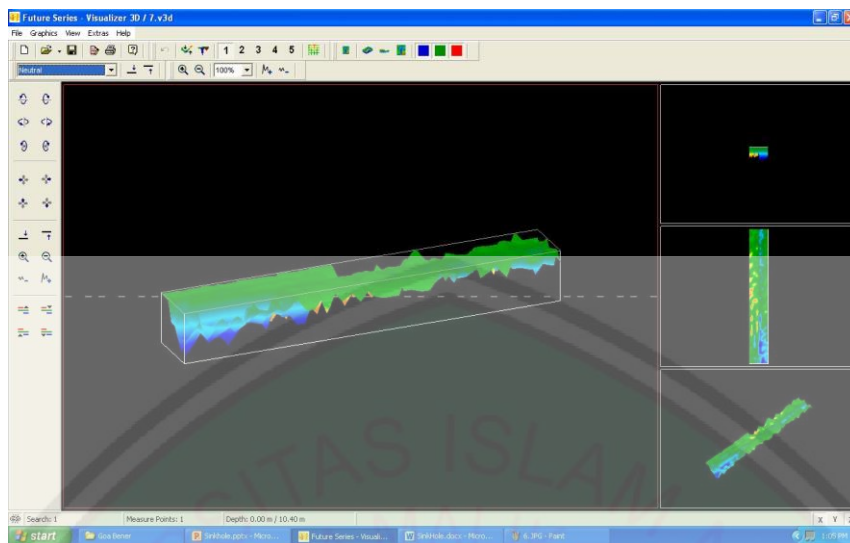
Line 10



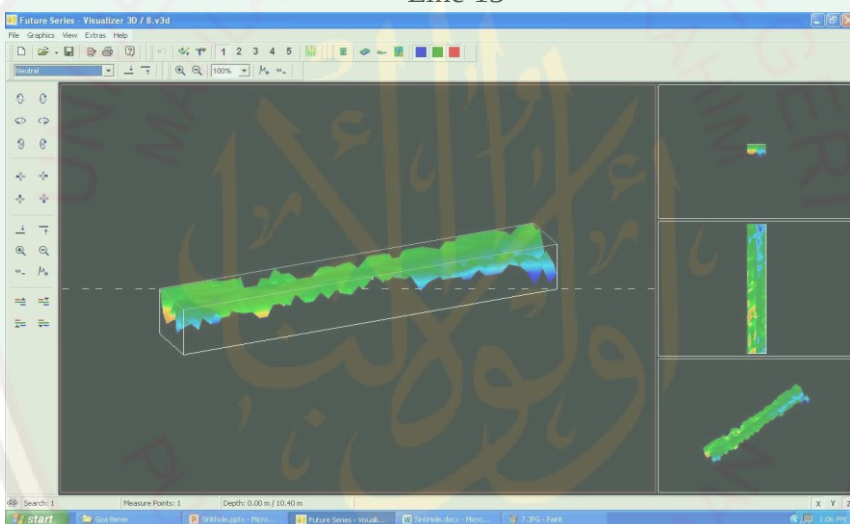
Line 11



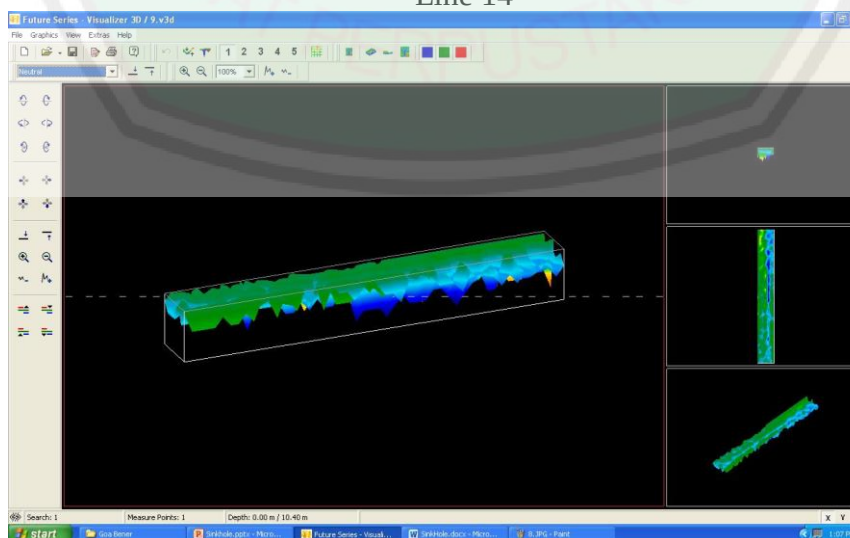
Line 12



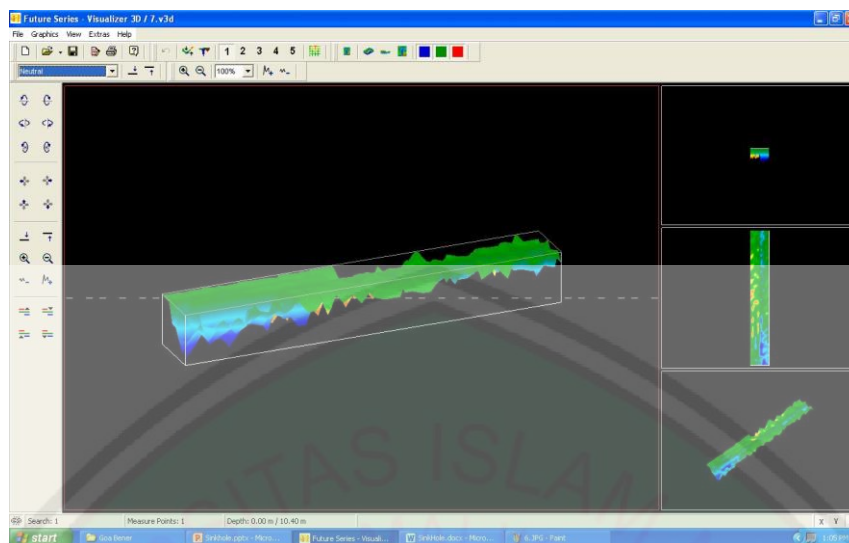
Line 13



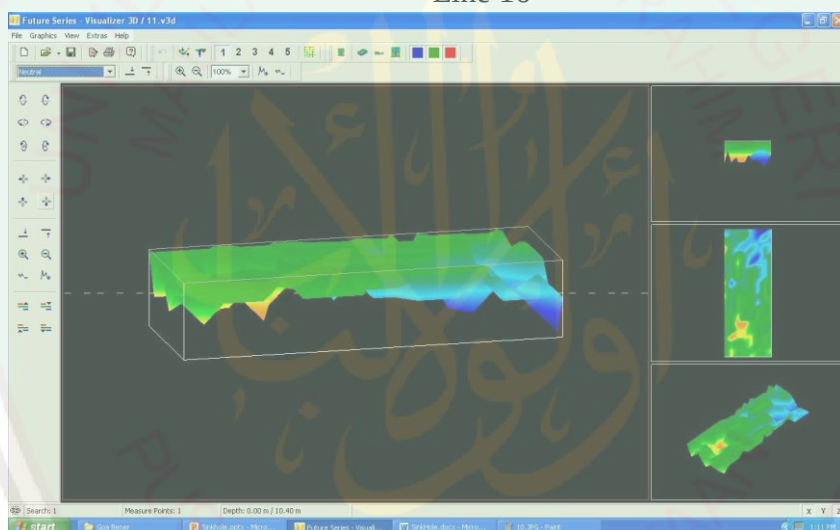
Line 14



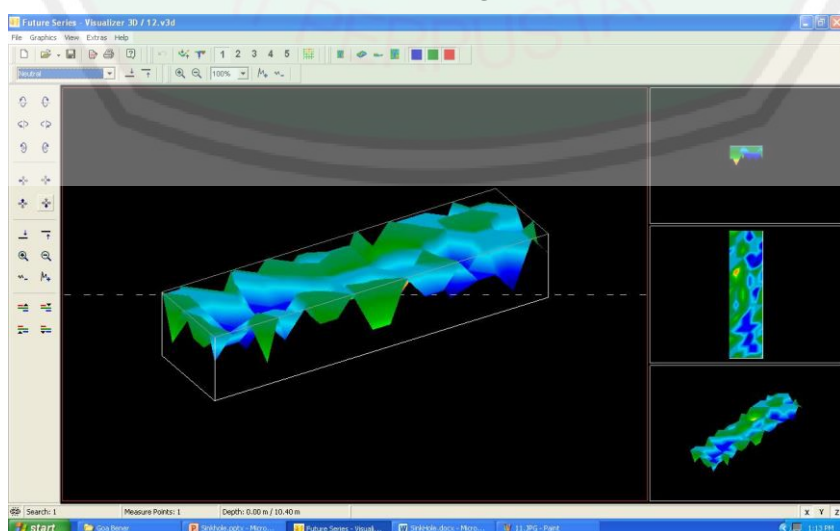
Line 15



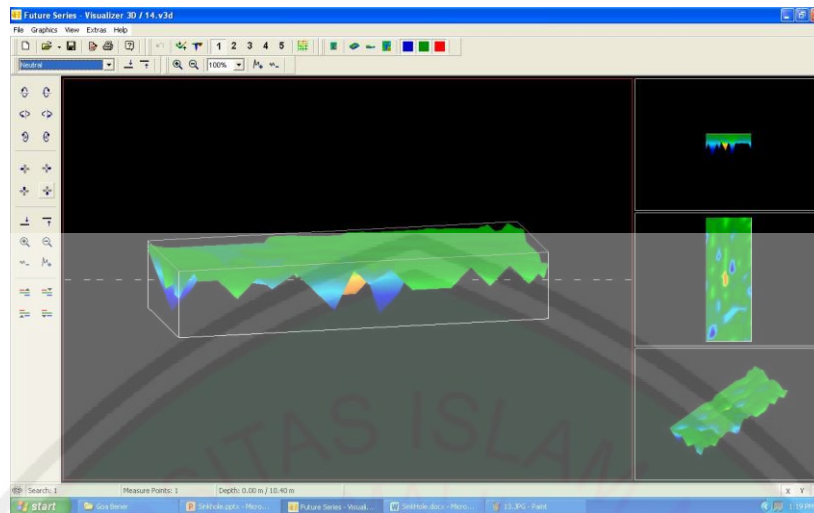
Line 16



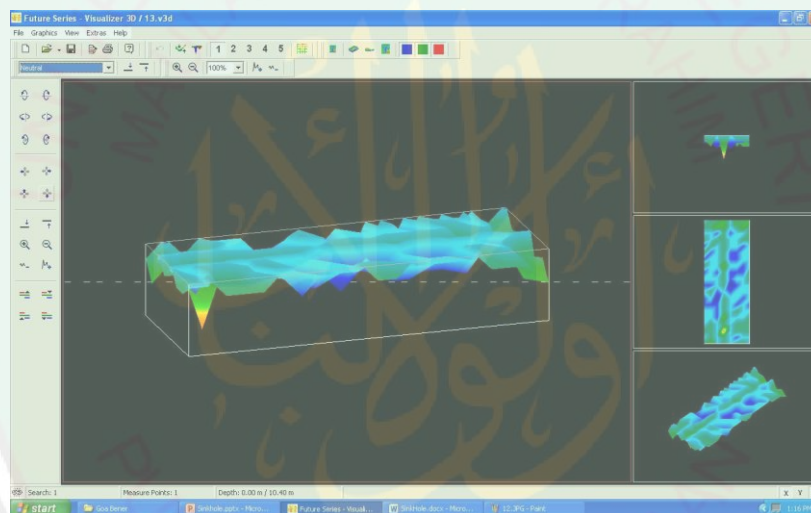
Line 17



Line 18



Line 19



Line 20

Lampiran 3 Aplikasi *Ground Penetrating Radar (GPR) Future Series 2005*

Alat GPR

1. *External Power Supply*
2. *Control Unit OKM*
3. *Gagang Probe*
4. *USB Bluetooth* (untuk menghubungkan laptop dan alat)
5. *Probe*
6. *Laptop* dengan perangkat lunak *visualizer 3D*

Langkah Awal Alat GPR

1. Dipastikan *Power Supply* telah di *charge* hingga penuh.
2. Dipasangkan *Probe* dengan *Gagang Probe*.
3. Dipasangkan *Probe* dengan *Control Unit*.
4. Disambungkan *Power Supply* (9V) dengan *Control Unit*.
5. Dipasangkan *Bluetooth* ke *Control Unit*.
6. Dipasangkan *Bluetooth* ke *Laptop*.
7. Dinyalakan *Control Unit* → OK.
8. Pada *Control Unit* dicari pilihan *Ground Scan* → OK.
9. Pada *Control Unit* dicari pilihan *Automatic Scan* → OK.
10. Pada *Control Unit* dicari pilihan *Impulse* (diatur sesuai desain akuisisi data) → OK.
11. *Transfer to Laptop* (Ditahan terlebih dahulu).
12. Dibuka *Software Visualizer 3D* pada *Laptop* → *New Project*.
 - *Measure, equipment* = *Future Series 2005*.
 - *Transfer Method* = *Wireless Connection*.
 - *Work Mode* = *Ground Scan*/ sesuai desain akuisisi data.
 - *Pulse* = Sesuai desain akuisisi data.
 - *Function* = Sesuai desain akuisisi data.
 - *COM Port* = Dilihat pada bagian “*Bluetooth Devices*” → Klik kiri → *Open Bluetooth Setting* → *Tab COM Ports* → Dilihat *COM Port* berapa saja yang tersedia, kemudian dicoba masing-masing *COM Port* yang tersedia.

- OK.

13. *Transfer to Laptop* → OK.

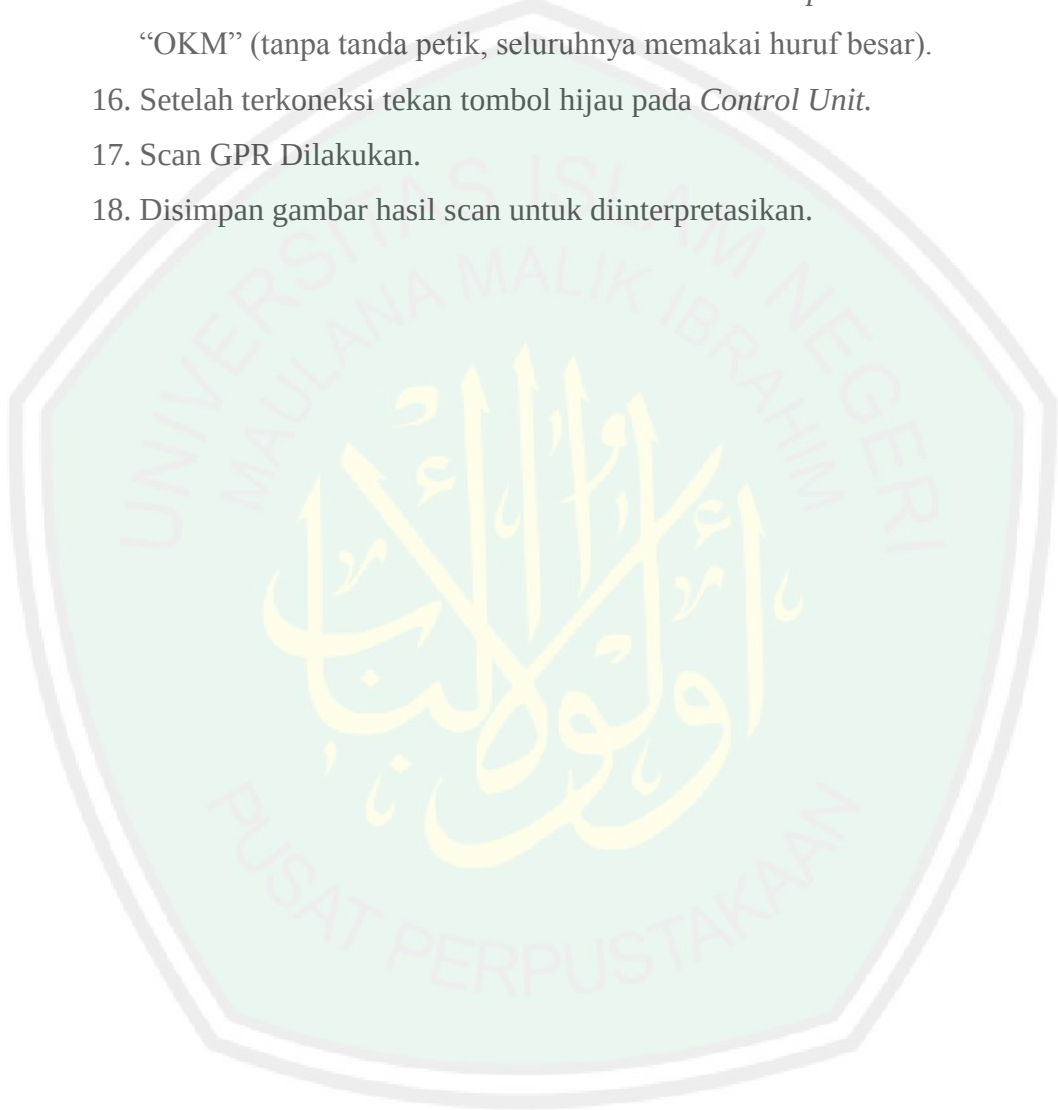
14. *Connecting to Laptop* → Ditunggu sampai *Bluetooth Control Unit* tersambung.

15. Diklik notifikasi koneksi *Bluetooth* → Dimasukkan *password Bluetooth* “OKM” (tanpa tanda petik, seluruhnya memakai huruf besar).

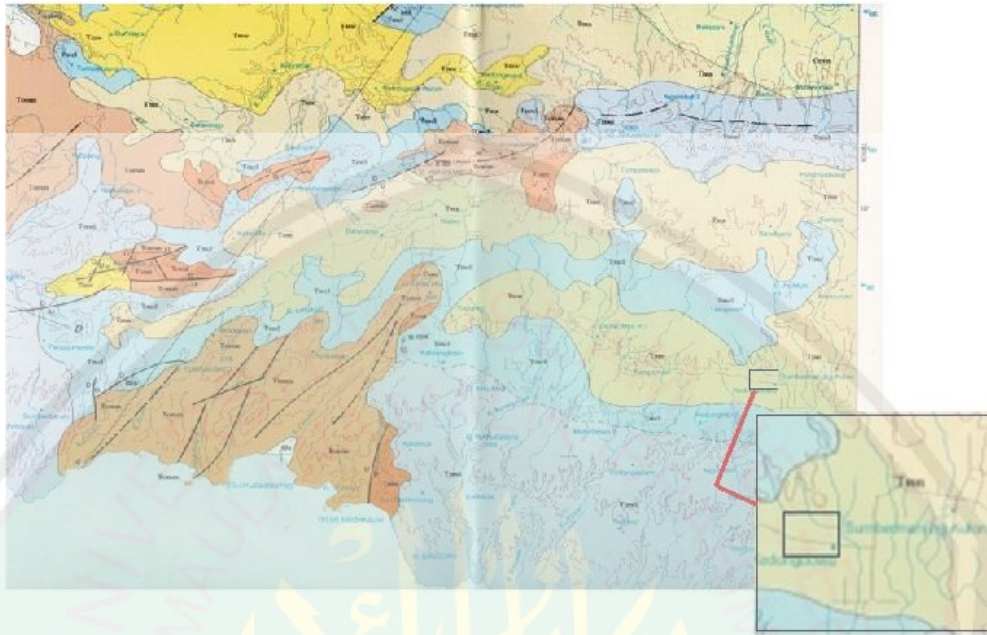
16. Setelah terkoneksi tekan tombol hijau pada *Control Unit*.

17. Scan GPR Dilakukan.

18. Disimpan gambar hasil scan untuk diinterpretasikan.



Lampiran 4 Peta Geologi Lembar Blitar



Lampiran 5 Dokumentasi Penelitian



Gambar 1 Para Akuisisi Data



Gambar 2 Persiapan Akuisisi Data



Gambar 3 Akuisisi Data