



**APLIKASI METODE GEOLISTRIK 2D DAN VOXLER UNTUK  
MENENTUKAN POTENSI AKUIFER DI SITUS KLANCENG,  
KABUPATEN JEMBER**

**SKRIPSI**

Oleh :

**Abrori Ali Akbar**

**NIM 151810201054**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2020**



**APLIKASI METODE GEOLISTRIK 2D DAN VOXLER UNTUK  
MENENTUKAN POTENSI AKUIFER DI SITUS KLANCENG,  
KABUPATEN JEMBER**

**SKRIPSI**

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Fisika (S-1)  
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh :

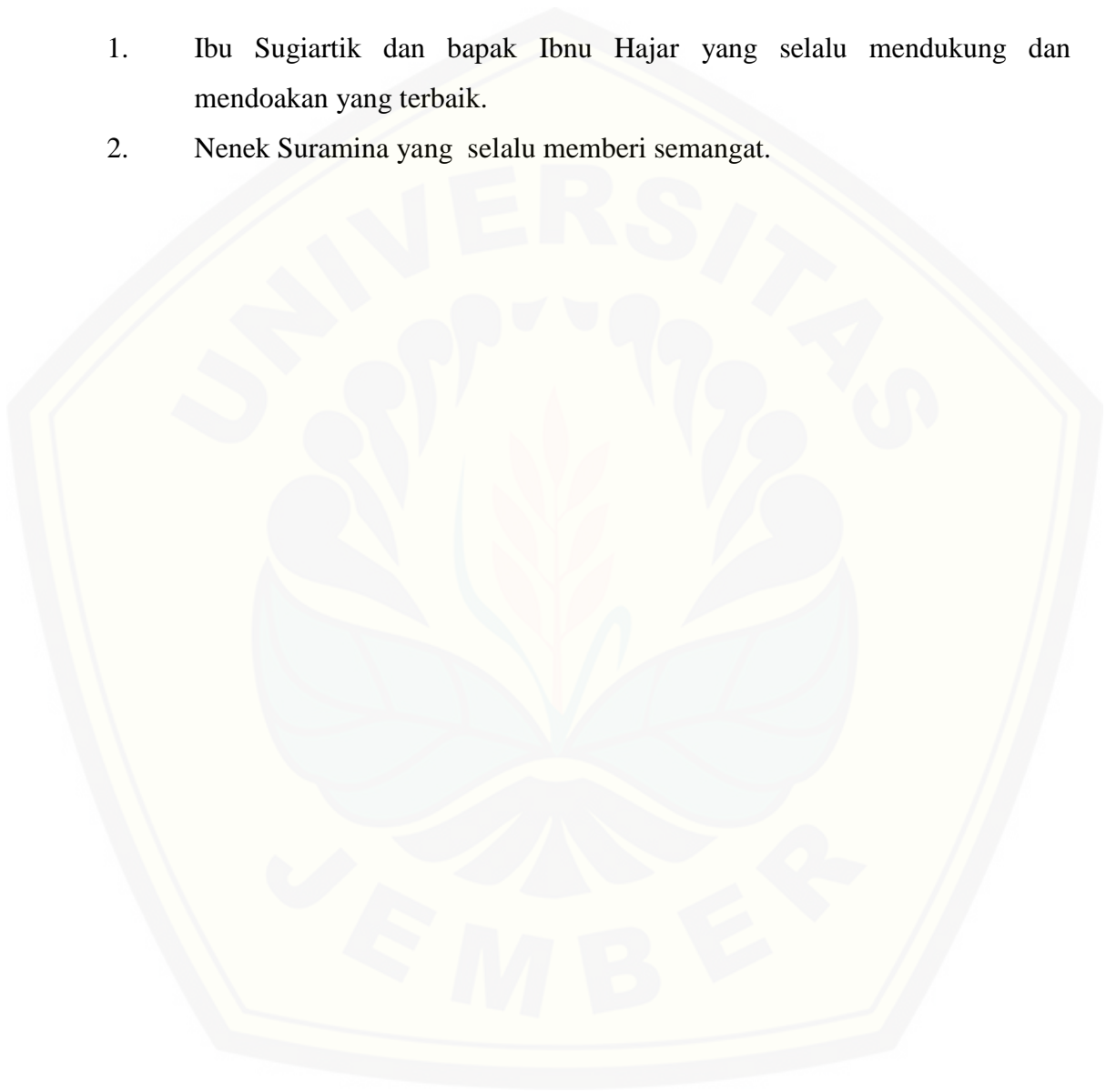
**Abrori Ali Akbar**  
**NIM 151810201054**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2020**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Ibu Sugiartik dan bapak Ibnu Hajar yang selalu mendukung dan mendoakan yang terbaik.
2. Nenek Suramina yang selalu memberi semangat.



**MOTTO**

Katakanlah, “Wahai hamba-hamba-Ku yang melampaui batas terhadap diri mereka sendiri! Janganlah kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya Allah mengampuni dosa-dosa semuanya. Sungguh, Dialah Yang Maha Pengampun, Maha Penyayang”.

(Terjemahan QS. Az Zumar [39] : 53)\*)

Keep the faith, atsiqoh Billah : pertahankan iman, percaya kepada Allah.

(Tengku Hanan Attaki)

---

\*)Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. Al-Qur'an dan terjemahannya. Semarang : PT. Kumudasmoro Grafindo

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Abrori Ali Akbar

NIM : 151810201054

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Aplikasi Metode Geolistrik 2D dan *Voxler* untuk Menentukan Potensi Akuifer di Situs Klanceng, Kabupaten Jember” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 24 Januari 2020

Yang menyatakan,

Abrori Ali Akbar

NIM 151810201054

**SKRIPSI**

**APLIKASI METODE GEOLISTRIK 2D DAN VOXLER UNTUK  
MENENTUKAN POTENSI AKUIFER DI SITUS KLANCENG,  
KABUPATEN JEMBER**

Oleh :

**Abrori Ali Akbar**

**NIM 151810201054**

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Nurul Priyantari, S.Si., M.Si.

Dosen Pembimbing Anggota : Supriyadi, S.Si., M.Si.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Aplikasi Metode Geolistrik 2D dan *Voxler* untuk Menentukan Potensi Akuifer di Situs Klanceng, Kabupaten Jember” karya Abrori Ali Akbar telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan  
Alam Universitas Jember

**Tim Penguji:**

Ketua,

Anggota I,

Nurul Priyantari, S.Si., M.Si.  
NIP. 197003271997022001

Supriyadi, S.Si., M.Si.  
NIP. 19820424006041003

Anggota II,

Anggota III,

Dr. Agus Suprianto, S.Si., M.T.  
NIP. 197003221997021001

Ir. Misto, M.Si.  
NIP. 195911211991031002

Mengesahkan  
Dekan,

Drs. Achmad Sjaifullah, M.Sc., Ph.D.

NIP 195910091986021001



## RINGKASAN

**Aplikasi Metode Geolistrik 2D dan *Voxler* untuk Menentukan Potensi Akuifer di Situs Klanceng, Kabupaten Jember;** Abrori Ali Akbar, 151810201054; 2020: 49 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.

Krisis air bersih merupakan salah satu isu permasalahan memiliki dampak besar terhadap kehidupan masyarakat di tingkat nasional maupun internasional dimana salah satu penyebabnya adalah perubahan iklim secara global. Tujuan dari penelitian ini yaitu mendeteksi keberadaan akuifer menggunakan metode geolistrik resistivitas konfigurasi *Wenner-Schlumberger* dan merekonstruksi gambaran bawah permukaan menggunakan *Voxler* untuk mendapatkan bentuk 3D. Rekonstruksi 3D bertujuan mengetahui jenis akuifer serta perkiraan volume akuifer yang ditemukan berdasarkan ukuran dan lapisan-lapisan pembatasnya.

Pendeteksian akuifer didasarkan pada nilai resistivitas air tanah dengan cara menginjeksikan arus pada permukaan bumi sehingga didapatkan nilai beda beda potensial dari material-material yang berada di bawah permukaan yang diinjeksi. Hasil arus dan beda potensial dikalikan faktor geometri untuk mendapatkan nilai resistivitas semu yang kemudian diinversi menggunakan aplikasi *Res2Dinv* guna mendapatkan citra 2D sebaran resistivitas di bawah permukaan. Data 2D yang telah diolah menggunakan aplikasi *Res2Dinv* dikonversi ke dalam bentuk 3D menggunakan aplikasi *Voxler*. Aplikasi tersebut digunakan untuk menggambarkan keberadaan dan bentuk akuifer yang berada di bawah permukaan tanah dengan mengunci nilai resistivitas dari air tanah di kawasan Situs Klanceng. Hasil rekonstruksi 3D yang telah diolah, kemudian dianalisis perkiraan volume dari akuifer tersebut. Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan di 2 lokasi berbeda. Lokasi pertama bertempat di kawasan Situs Klanceng dan lokasi kedua bertempat di sekitar sumber mata air Manggar. Masing-masing lokasi dibuat dua lintasan sejajar.

Berdasarkan hasil pengambilan data, didapatkan nilai sebaran resistivitas untuk lokasi 1 sebesar  $(0,8 - 183) \Omega\text{m}$ . Berdasarkan nilai sebaran resistivitas tersebut, didapatkan nilai resistivitas yang diduga sebagai lapisan air tanah sebesar  $(0,8 - 6,8) \Omega\text{m}$  yang berada pada kedalaman  $(1,5 - 11,1) \text{m}$ . Sementara itu, untuk lokasi 2 didapatkan nilai sebaran resistivitas sebesar  $(2,4 - 164,4) \Omega\text{m}$ . Berdasarkan nilai sebaran resistivitas tersebut, didapatkan nilai resistivitas yang diduga sebagai lapisan air tanah sebesar  $(2,4 - 7,9) \Omega\text{m}$  yang berada pada kedalaman  $(3,8 - 15,9) \text{m}$ . Nilai resistivitas tersebut, diinterpretasi lebih lanjut menggunakan aplikasi *Voxler* dan didapatkan perkiraan volume akuifer  $\pm 4,4 \text{ m}^3$ .



Berdasarkan ukuran akuifer dan lapisan-lapisan pembatasnya diketahui bahwa akuifer yang ditemukan merupakan jenis akuifer bebas. Oleh karena itu, tipikal air tanah yang dipakai oleh masyarakat di kawasan ini adalah air tanah dangkal (freatis) yang merupakan air tanah oleh tangkapan air setempat (*Local Catchment Area*) dengan cadangan sangat terbatas. Hal tersebut tergantung dengan seberapa banyak air hujan yang masuk ke dalam tanah dan tertampung di dalamnya.



## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Aplikasi Metode Geolistrik 2D dan *Voxler* untuk Menentukan Potensi Akuifer di Situs Klanceng, Kabupaten Jember” sesuai waktu yang telah direncanakan. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

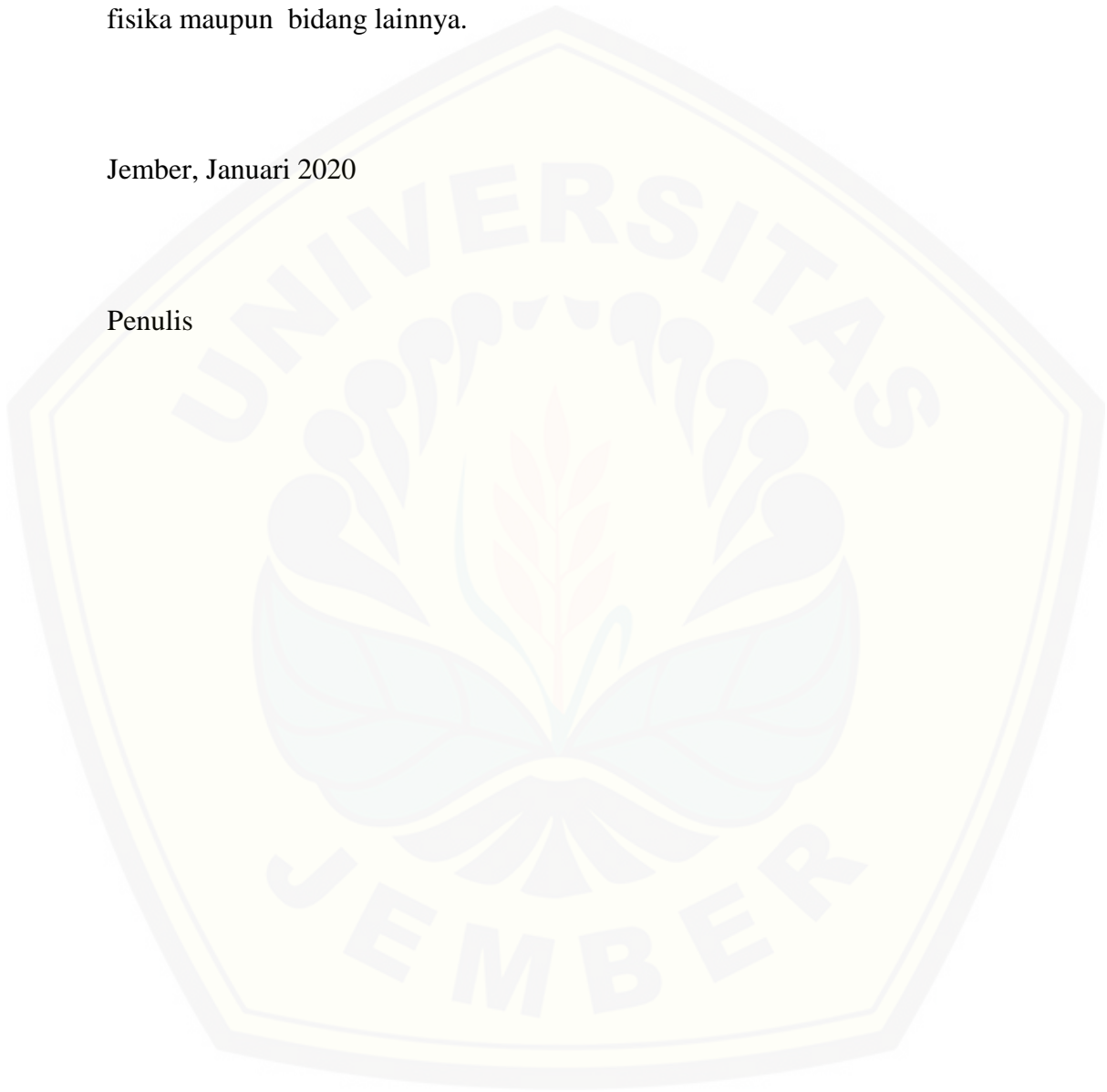
1. Ibu Nurul Priyantari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Supriyadi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran serta ilmu yang sangat bermanfaat dalam penulisan skripsi ini;
2. Bapak Dr. Agus Suprianto, S.Si., M.T., selaku Dosen Penguji I dan Bapak Ir. Misto, M.Si., selaku Dosen Penguji II, yang telah memberikan nasehat serta kritik dan saran untuk kesempurnaan skripsi ini;
3. Ibu Wenny Maulina, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
4. Sahabat-sahabat saya : Achmad Dafir, M. Hizqi Faidun N., Ahmad Muzacky, Misbahul Marzuki yang selalu menemani dalam suka dan duka
5. Teman-teman saya : Agus Purwanto, Taqrub Iyyaka, M. Arifudin Syahrul Maulud, Rochmad Hidayat, Siti Rohimah, Erni Emawati, Pipin Okvitasari, Arik Irawati, Firman Wahidi, Frendy Wahyudi, Nurifa Yuni L., Faridatur Riskiya dan seluruh mahasiswa fisika angkatan 2015, yang telah mendukung dan membantu saya;
6. Tim Geofisika yang selalu menemani selama menulis skripsi ini;
7. Keluarga KKN 42 yang selalu memberikan semangat untuk menyelesaikan studi bersama;

8. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu;

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca serta perkembangan ilmu pengetahuan di bidang fisika maupun bidang lainnya.

Jember, Januari 2020

Penulis



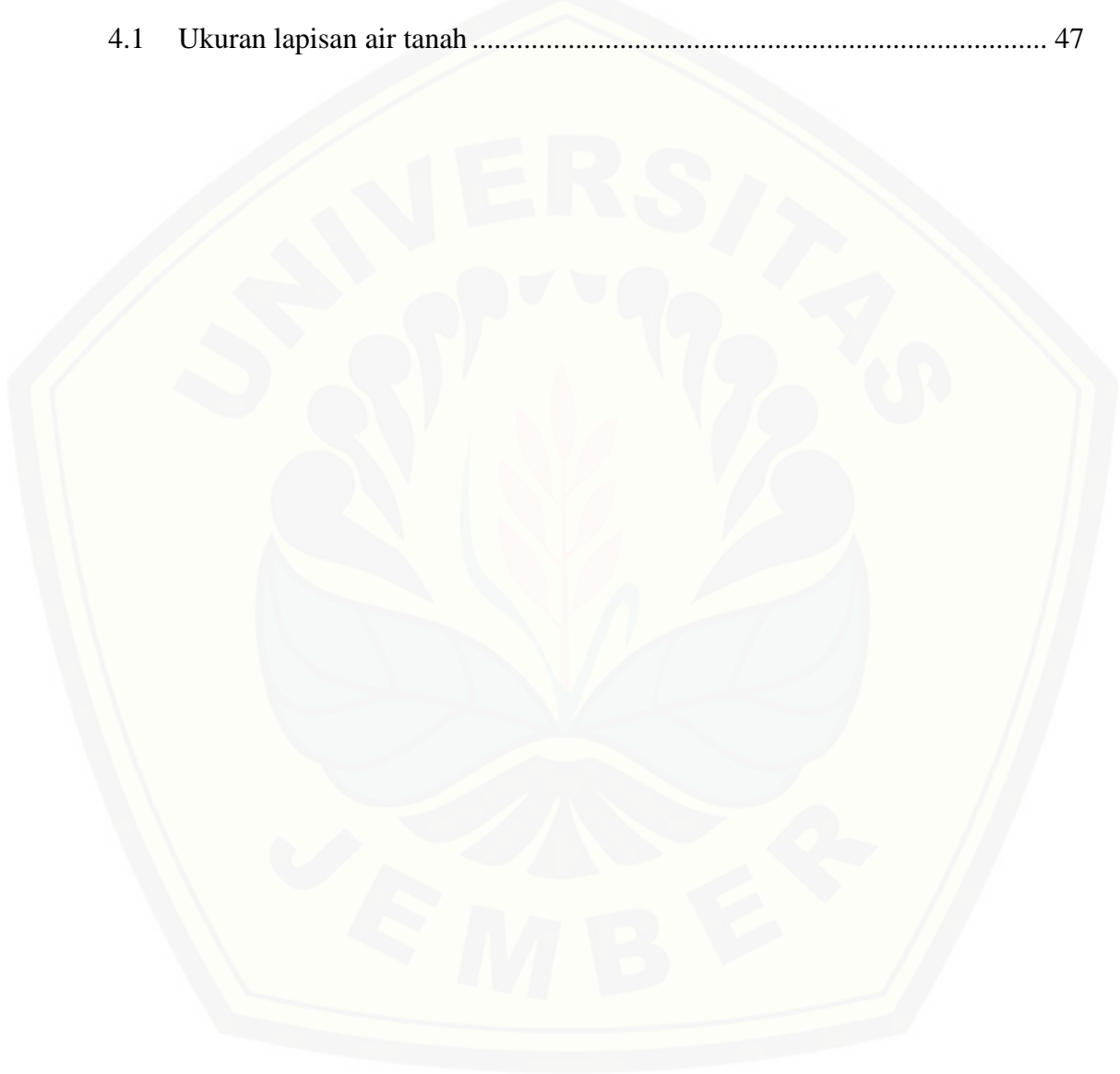
DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>PRAKATA</b> .....	x
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvi
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	6
<b>1.3 Tujuan</b> .....	6
<b>1.4 Manfaat</b> .....	6
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
<b>2.1 Situasi Kondisi dan Letak Geografis Daerah Penelitian</b> .....	7
<b>2.2 Siklus Hidrologi</b> .....	8
<b>2.3 Sumber Daya Air</b> .....	10
<b>2.4 Air Tanah</b> .....	12
<b>2.5 Akuifer</b> .....	13
<b>2.6 Porositas dan Permeabilitas</b> .....	16
<b>2.7 Sifat Kelistrikan Batuan dan Mineral</b> .....	17
2.7.1 Konduksi Elektronik.....	17
2.7.2 Konduksi Elektrolit.....	17
2.7.3 Konduksi Dielektrik.....	18
<b>2.8 Resistivitas Batuan</b> .....	18
<b>2.9 Metode Geolistrik Resistivitas</b> .....	19
2.9.1 Titik Arus Tunggal di Permukaan .....	21
2.9.2 Dua Titik Arus di Permukaan .....	22
<b>2.10 Konfigurasi Wenner-Schlumberger</b> .....	25
<b>2.11 Resistivitas Semu (<i>Apparent Resistivity</i>)</b> .....	26
<b>2.12 Aplikasi <i>Res2Dinv</i> dan <i>Voxler</i></b> .....	27

2.12.1	<i>Res2Dinv</i> .....	27
2.12.2	<i>Voxler</i> .....	28
<b>BAB 3.</b>	<b>METODE PENELITIAN</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Rancangan Penelitian</b> .....	<b>30</b>
3.1.1	Kajian Pustaka .....	31
3.1.2	Survei Lokasi Penelitian .....	31
3.1.3	Persiapan Alat Penelitian .....	32
3.1.4	Penentuan Titik Pengambilan Data dan Lintasan .....	33
3.1.5	Pengambilan Data Menggunakan Metode Geolistrik 2D..	35
3.1.6	Pengolahan Data Menggunakan Aplikasi <i>Res2Dinv</i> dengan Memasukkan Data Elevasi .....	36
3.1.7	Pengolahan Data 2D yang Dikonversi dalam 3D Menggunakan Aplikasi <i>Voxler</i> .....	36
3.1.8	Interpretasi dan Analisis Data.....	36
3.1.9	Penarikan Kesimpulan .....	37
<b>3.2</b>	<b>Jenis dan Sumber Data</b> .....	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Variabel Penelitian</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4</b>	<b>Metode dan Analisa Data</b> .....	<b>38</b>
<b>3.5</b>	<b>Kerangka Pemecahan Masalah</b> .....	<b>39</b>
<b>BAB 4.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Pengukuran dengan Metode Geolistrik Resistivitas</b> .....	<b>40</b>
4.1.1	Lintasan 1.....	40
4.1.2	Lintasan 2.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.1.3	Lintasan 3.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.1.4	Lintasan 4.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>4.2</b>	<b>Rekonstruksi Menggunakan <i>Voxler</i></b> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>BAB 5.</b>	<b>PENUTUP</b> .....	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Kesimpulan</b> .....	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Saran</b> .....	<b>48</b>
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>50</b>
	<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>54</b>

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
2.1 Potensi cekungan air tanah .....	11
2.2 Nilai resistivitas batuan dan mineral bumi .....	18
4.1 Ukuran lapisan air tanah .....	47



**DAFTAR GAMBAR**

	Halaman
2.1 Peta geologi lembar Arjasa, Jember .....	8
2.2 Diagram skematis dari berbagai fluks dalam siklus hidrologi .....	9
2.3 Skema lapisan air tanah .....	13
2.4 Skema situasi akuifer yang umum .....	15
2.5 Sistem aliran air tanah di akuifer besar .....	16
2.6 Sumber arus berupa titik pada permukaan bumi homogen .....	22
2.7 Dua pasang elektroda arus dan elektroda potensial pada permukaan medium homogen isotropis dengan resistivitas $\rho$ .....	24
2.8 Pola aliran arus dan bidang ekuipotensial antara dua elektroda arus dengan polaritas berlawanan.....	24
2.9 Spasi antar elektroda pada konfigurasi <i>Wenner-Schlumberger</i> .....	25
2.10 Penampang 2D datum hasil pengukuran .....	27
2.11 Hasil penampang 2D menggunakan aplikasi <i>Res2Dinv</i> dengan nilai elevasi .....	28
2.12 Hasil penampang 3D menggunakan aplikasi <i>Voxler</i> .....	29
3.1 Diagram alir rancangan penelitian .....	30
3.2 Peta lokasi penelitian di kawasan Situs Klanceng .....	32
3.3 Lintasan pengambilan data di lokasi pertama .....	33
3.4 Lintasan pengambilan data di lokasi kedua .....	34
3.5 Diagram alir kerangka pemecahan masalah penelitian .....	39
4.1 Citra 2D bawah permukaan lintasan 1 .....	42
4.2 Citra 2D bawah permukaan lintasan 2.....	43
4.3 Citra 2D bawah permukaan lintasan 3.....	43
4.4 Citra 2D bawah permukaan lintasan 4.....	45
4.5 Citra 3D lokasi 2 yang mempresentasikan air tanah menggunakan <i>Voxler</i> .....	47
4.6 Citra 3D seluruh penampang lokasi 2 menggunakan <i>Voxler</i> .....	47



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>A. Data Hasil Pengamatan</b> .....	54
A.1 Data hasil pengamatan lintasan 1 .....	54
A.2 Data hasil pengamatan lintasan 2 .....	56
A.3 Data hasil pengamatan lintasan 3 .....	59
A.4 Data hasil pengamatan lintasan 3 .....	60
<b>B. Dokumentasi penelitian</b> .....	62
B.2 Situs Klanceng .....	62
B.3 Sumber mata air Manggar .....	62
B.4 Penancapan elektroda potensial dan elektroda arus .....	62
B.5 Proses injeksi arus listrik .....	63

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Air merupakan salah satu sumber daya alam yang memiliki peranan penting bagi kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya. Air adalah awal dari segala macam bentuk kehidupan di bumi. Sebagai sumber daya alam, ketersediaan air sangat penting untuk memenuhi kebutuhan domestik, irigasi dan industri. Oleh karena kebutuhan air yang semakin hari semakin meningkat, maka bukan tidak mungkin air di muka bumi ini akan tidak mencukupi karena ketersediaannya yang terbatas (Semekto, 2016).

Salah satu isu permasalahan yang berdampak besar terhadap ketersediaan air dan menjadi perhatian banyak pihak baik di tingkat nasional maupun internasional adalah permasalahan perubahan iklim (*climate change*). *Climate change* adalah suatu perubahan pada iklim yang dipengaruhi secara langsung maupun tidak langsung oleh aktivitas manusia yang mengubah komposisi atmosfer. Hal tersebut akan memperbesar keragaman iklim yang teramati pada periode yang cukup panjang (IPCC, 2007). Indonesia merupakan salah satu negara tropis di dunia yang hanya memiliki 2 musim saja, yaitu musim penghujan dan musim kemarau. Musim penghujan terjadi pada bulan Oktober hingga Maret, sedangkan musim kemarau biasanya berlangsung pada bulan April hingga September (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2019). Perubahan iklim global mengakibatkan waktu terjadinya kedua musim tersebut sampai saat ini tidak tentu datangnya. Ketidaktentuan waktu terjadinya musim penghujan dan musim kemarau di Indonesia berpotensi menimbulkan suatu kerawanan dan bahaya yang mengancam kehidupan makhluk hidup di dalamnya (Dhani, 2014).

Dampak ketidaktentuan perubahan musim juga dapat dirasakan di Kabupaten Jember, tepatnya di Desa Kamal, Kecamatan Arjasa adalah krisis air bersih. Peristiwa krisis air bersih di Desa Kamal terjadi setiap tahun di periode musim kemarau, padahal Desa Kamal sendiri merupakan salah satu wilayah di Kabupaten Jember yang memiliki potensi menjadi desa wisata dengan banyak

ditemukannya batuan peninggalan Zaman Megalitikum. Berdasarkan data peninggalan yang telah diinventarisasi terdapat 4 situs di wilayah tersebut, yaitu Situs Duplang, Kendal, Kebun Jurang, dan Klanceng (Adimah *et al.*, 2013). Situs Duplang yang berada di Desa Kamal ini bisa menjadi destinasi arkeowisata yang cukup potensial. Hal tersebut didukung dengan banyaknya peninggalan Zaman Megalitikum, diantaranya terdapat Batu Kenong (12 buah), Menhir (2 buah) dan sebuah Kubur Batu (Farhan, 2017). Situs Duplang juga memiliki fasilitas umum yang cukup baik dengan adanya kamar mandi, *rest area*, dan tempat ibadah. Hal tersebut menjadi nilai tambah bagi Situs Duplang untuk menarik pengunjung dibanding dengan Situs Kendal, Kebun Jurang dan Klanceng. Seperti halnya Situs Duplang, Situs Klanceng pun sangat potensial untuk dikembangkan. Hal tersebut didukung dengan banyaknya peninggalan Zaman Megalitikum, diantaranya terdapat Batu Kenong (76 buah), Dolmen (4 buah), Lumpang dan Gilis ( masing-masing 1 buah) (Farhan, 2017). Menurut pengelola Situs Klanceng, di daerah ini masih banyak lagi peninggalan-peninggalan yang masih terpendam di dalam tanah. Hal tersebut dapat dilihat dari beberapa singkapan-singkapan batu kenong, dolmen dan lain-lain di daerah tersebut. Peninggalan Zaman Megalitikum di Kawasan Situs Klanceng ada yang sudah direlokasi, namun cukup banyak yang masih tersebar di beberapa lokasi.

Potensi kawasan Situs Klanceng sebagai Kawasan Arkeowisata sangatlah besar, dengan cukup banyaknya peninggalan Zaman Megalitikum yang tersebar di beberapa rumah penduduk dengan jenis yang beragam. Hal tersebut menjadi salah satu daya tarik pengunjung, karena selain melihat langsung posisi peninggalan tersebut juga bisa mempelajari kondisi geografis kawasan tersebut. Sementara itu, kekurangan dari Situs Klanceng adalah tidak adanya fasilitas umum seperti yang terdapat di Situs Duplang. Masalah utama Dusun Klanceng adalah daerah tersebut kesulitan untuk mendapatkan air bersih terutama saat musim kemarau tiba. Hal tersebut menjadi salah satu alasan belum tersedianya fasilitas umum di Situs Klanceng hingga saat ini.

Pemerintah diketahui belum menyalurkan air PDAM di Desa Kamal Kecamatan Arjasa Kabupaten Jember. Hal ini dikarenakan tidak adanya air baku

yang mencukupi untuk desa tersebut. Berdasar peta geologi lembar Jember (Sapei *et al.*, 1992), menunjukkan bahwa wilayah Desa Kamal merupakan bagian dari Pegunungan Iyang-Argopuro tepatnya Breksi Argopuro. Pegunungan Iyang-Argopuro secara regional termasuk dalam sistem tektonik Jawa Timur, yang berkembang menunjukkan bentuk diagonal dengan arah Barat Laut-Tenggara dan Timur Laut-Barat Daya. Secara umum kondisi tanah di kawasan ini merupakan daerah tanah kering. Batuan pegunungan Iyang-Argopuro terdiri dari batuan piroklastik, andesit, andesit basaltik, basalt, disebutkan pula batuan tersebut termasuk di dalam Sub-Alkalin. Karakteristik dari formasi ini mempunyai porositas dan permeabilitas rendah serta kedap air (Chaniago dan Yuhan, 1995). Tipikal air tanah yang dipakai oleh masyarakat di kawasan ini adalah air tanah dangkal (freatis) yang merupakan air tanah oleh tangkapan air setempat (*Local Catchment Area*) dengan cadangan sangat terbatas. Air tanah dangkal biasanya berada di kedalaman kurang dari 40 m. Air tanah ini bergerak dari tempat yang tinggi ke tempat yang lebih rendah. Oleh karena itu, di daerah yang lebih rendah, potensi air tanahnya relatif lebih besar dibandingkan di daerah puncak bukit atau gunung (Christine, 2012). Masyarakat di kawasan Dusun Klanceng bergantung pada dua sumber mata air dalam memenuhi kebutuhan rumah tangga yakni sumber mata air Etam dan sumber mata air Manggar. Kedua sumber mata air tersebut tidak kering meskipun di musim kemarau. Jarak Situs Klanceng yang cukup jauh dengan sumber mata air tentunya menjadi suatu kendala bagi upaya pengembangan kawasan tersebut menuju Kawasan Arkeowisata.

Oleh karena itu, diperlukan perencanaan pendeteksian potensi air tanah di Kawasan Situs Klanceng. Hal tersebut memerlukan informasi terkait kondisi geologi, metodologi dan alat ukur yang dapat mengukur parameter-parameter fisika yang berasosiasi dengan keberadaan air tanah tersebut. Salah satu metode yang bisa dilakukan untuk mendeteksi keberadaan air tanah adalah metode geolistrik resistivitas. Metode geolistrik resistivitas digunakan untuk mempelajari keadaan bawah permukaan dengan cara mempelajari sifat aliran listrik di dalam batuan di bawah permukaan bumi berdasarkan perbedaan resistivitas batuan. Pada metode geolistrik resistivitas arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi melalui

empat buah elektroda, yakni dua buah elektroda potensial dan dua buah elektroda arus (Reynolds, 1997). Metode ini memiliki beberapa bentuk konfigurasi, yakni konfigurasi *Wenner*, *Schlumberger*, *Wenner-Schlumberger*, *Dipole-Dipole* dan *Pole-Pole*. Menurut Telford *et al.*, (1990), air tanah memiliki nilai resistivitas di rentang  $(0 - 300) \Omega\text{m}$ . Air tanah terbentuk dalam beberapa jenis formasi geologis, yang paling utama dikenal sebagai akuifer.

Penelitian mengenai akuifer menggunakan metode geolistrik telah berhasil dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya oleh Buwana (2019), melakukan identifikasi sebaran akuifer di lingkungan FMIPA Universitas Jember menggunakan metode geolistrik resistivitas konfigurasi *Schlumberger*. Potensi akuifer di lokasi daerah gumuk berada pada kedalaman  $< 2$  m dan lokasi kedua di lingkungan FMIPA, pada kedalaman  $\leq 11$  m. Nilai resistivitas air tanah didapatkan di rentang  $(0,5 - 23,24) \Omega\text{m}$ . Ayuni *et al.*, (2015), melakukan pemodelan 3D akuifer untuk irigasi dengan menggunakan aplikasi *Voxler* di Tanjung Karang, Selangor, Malaysia. Nilai resistivitas air tanah didapatkan di rentang  $(50 - 250) \Omega\text{m}$ . Hasil pemodelan 3D menggunakan *Voxler* pada penelitian ini didapatkan lokasi-lokasi yang memiliki potensi akuifer cukup besar untuk pemanfaatan irigasi pertanian. Irawati *et al.*, (2016), menggunakan metode geolistrik resistivitas dengan konfigurasi *Wenner-Schlumberger* untuk mengidentifikasi sebaran akuifer di Desa Bora Kecamatan Sigi Biromari Kabupaten Sigi. Desa Bora merupakan daerah dengan kondisi permukaan tanah kering yang berada di ketinggian  $> 200$  m di atas permukaan laut. Nilai resistivitas air tanah didapatkan  $\leq 85 \Omega\text{m}$  dan lapisan akuifer terdeteksi menyebar hingga kedalaman 40 m. Puluiyo *et al.*, (2018), melakukan perbandingan konfigurasi *Wenner*, *Wenner-Schlumberger*, dan *Dipole-Dipole* dalam mendeteksi keberadaan air tanah. Nilai resistivitas air tanah didapatkan  $\leq 16 \Omega\text{m}$ . Struktur per lapisan yang diperoleh dari konfigurasi *Wenner-Schlumberger* terlihat lebih baik dibanding dengan hasil konfigurasi *Wenner* dan konfigurasi *Dipole-Dipole*. Sementara itu, dalam segi kedalaman konfigurasi *Wenner-Schlumberger* memperoleh sebaran lapisan akuifer hingga kedalaman 16 m, konfigurasi *Wenner* memperoleh sebaran lapisan akuifer hingga kedalaman 10 m, dan konfigurasi



*Dipole-Dipole* memperoleh sebaran lapisan akuifer hingga kedalaman 6,5 m. Ravindran *et al.*, (2012), menggunakan metode geolistrik resistivitas dengan konfigurasi *Wenner-Schlumberger* untuk eksplorasi air tanah di Mahapallipuram, India. Nilai resistivitas air tanah teridentifikasi di rentang (10 – 100)  $\Omega\text{m}$  dan lapisan akuifer menyebar hingga kedalaman maksimal 39 m. Mohamaden *et al.*, (2016), mengaplikasikan metode geolistrik resistivitas dengan konfigurasi *Schlumberger* di kawasan Mogra, Mesir. Nilai resistivitas air tanah direntang (17 – 111)  $\Omega\text{m}$  dan lapisan akuifer menyebar hingga kedalaman maksimal 14,7 m.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, penulis dalam hal ini merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Puluiyo *et al.*, (2018), dimana hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi *Wenner-Schlumberger* lebih efektif dengan diperolehnya struktur perlapisan yang lebih baik dan sebaran lapisan akuifer yang lebih dalam dibanding konfigurasi *Wenner* dan konfigurasi *Dipole-Dipole*. Menurut Loke (2000), Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* cukup sederhana dalam menentukan nilai resistivitas tanah. Kelebihan lainnya adalah konfigurasi ini memiliki cakupan horizontal dan penetrasi kedalaman yang lebih baik dibanding dengan konfigurasi yang lain. Penulis juga merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Ayuni *et al.*, (2015), dimana pada penelitian ini berhasil melakukan pemodelan 3D untuk mendapatkan potensi akuifer untuk irigasi dengan menggunakan aplikasi *Voxler*.

Berangkat dari latar belakang di atas, maka penulis berkeinginan untuk mengidentifikasi potensi akuifer di kawasan Situs Klanceng, Desa Kamal, Kecamatan Arjasa, Kabupaten Jember menggunakan metode geolistrik resistivitas konfigurasi *Wenner-Schlumberger*. Sedangkan untuk mendapatkan perkiraan bentuk dan ukuran dari akuifer yang telah teridentifikasi, akan digunakan *software Voxler*. Hasil yang didapatkan dari pengolahan menggunakan *Voxler* menjadi acuan seberapa besar potensi akuifer di lokasi penelitian. Hasil penelitian ini diharapkan bisa membantu masyarakat Desa Kamal khususnya kawasan Situs Klanceng dalam mengatasi krisis air bersih, sehingga dapat dilakukan pengembangan Situs Klanceng menjadi Kawasan Arkeowisata.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimanakah bentuk dan ukuran lapisan tanah yang diduga sebagai lapisan akuifer dengan menggunakan metode geolistrik resistivitas 2D dan *software Voxler*?
2. Bagaimanakah potensi akuifer di kawasan Situs Klanceng, Desa Kamal, Kecamatan Arjasa, Kabupaten Jember?
3. Jenis akuifer apa yang terdapat di Kawasan Situs Klanceng, Desa Kamal, Kecamatan Arjasa, Kabupaten Jember?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menentukan bentuk dan ukuran lapisan tanah yang diduga sebagai lapisan akuifer dengan menggunakan metode geolistrik resistivitas 2D dan *software Voxler*.
2. Mendapatkan potensi akuifer di kawasan Situs Klanceng, Desa Kamal, Kecamatan Arjasa, Kabupaten Jember.
3. Mengetahui jenis akuifer yang terdapat di Kawasan Situs Klanceng, Desa Kamal, Kecamatan Arjasa, Kabupaten Jember.

## 1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi terkait potensi akuifer di kawasan Situs Klanceng. Berdasarkan hasil yang didapatkan, diharapkan dapat bermanfaat bagi masyarakat di Desa Kamal, Kecamatan Arjasa, Kabupaten Jember khususnya yang berada di kawasan Situs Klanceng dalam mengatasi krisis air bersih. Hal tersebut dapat membantu pengembangan Situs Klanceng menjadi Kawasan Arkeowisata. Selain itu, diharapkan memberikan tambahan pemikiran dan ilmu pengetahuan khususnya di bidang geofisika serta sebagai referensi untuk mahasiswa fisika, khususnya geofisika untuk melakukan penelitian berikutnya.



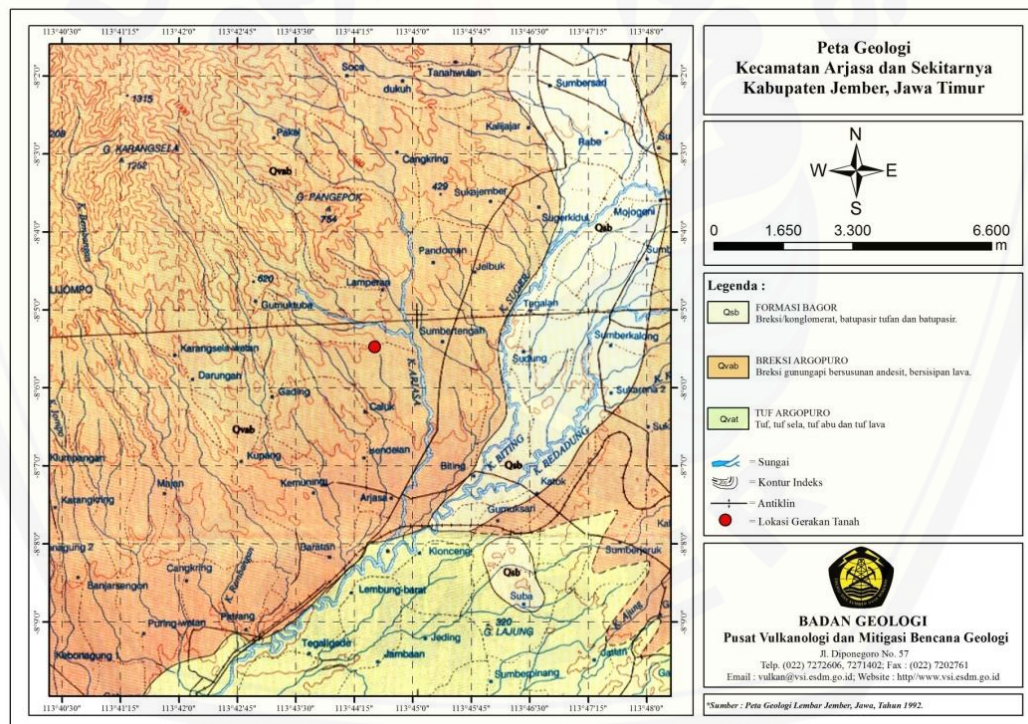
## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Situasi Kondisi dan Letak Geografis Daerah Penelitian

Kabupaten Jember terletak di bagian selatan Provinsi Jawa Timur. Secara geografis Kabupaten Jember terletak pada koordinat ( $7^{\circ}59'6'' - 8^{\circ}33'56''$ ) LS dan ( $113^{\circ}16'28'' - 114^{\circ}03'42''$ ) BT. Kabupaten Jember memiliki luas wilayah kurang lebih  $3.293,34 \text{ km}^2$  (Bappeda, 2013). Kabupaten Jember memiliki 31 kecamatan, salah satunya adalah Kecamatan Arjasa. Kecamatan Arjasa terdiri dari enam desa, salah satunya adalah Desa Kamal. Secara Geografis, Desa Kamal terletak pada koordinat  $8^{\circ}5'20''$  LS dan  $113^{\circ}44'40''$  BT. Desa Kamal berada pada ketinggian (145 – 300) mdpl. Kantor Desa Kamal terletak 1,5 km kantor Kecamatan Arjasa. Desa Kamal dikelilingi oleh empat desa. Sebelah utara berbatasan dengan Desa Panduman Kecamatan Jelbuk, di sebelah timur berbatasan dengan Desa Candijati Kecamatan Arjasa, di sebelah selatan berbatasan dengan Desa Arjasa Kecamatan Arjasa, sedangkan di sebelah barat berbatasan dengan Desa Darsono Kecamatan Arjasa. Desa Kamal terdiri dari lima dusun, diantaranya adalah Dusun Klanceng, Dusun Kendal, Dusun Krajan, Dusun Kebun Jurang dan Dusun Duplang. Menurut Badan Pusat Statistik Kabupaten Jember (2010), Desa Kamal memiliki jumlah penduduk sekitar 5.427 jiwa. Desa Kamal merupakan desa tertua yang telah ada sejak zaman pra-sejarah dan salah satu daerah penemuan situs megalitikum berupa arca, menhir, batu kenong, kubur batu dan dolmen (Pemerintah Desa Kamal, 2012).

Berdasar peta geologi lembar Jember pada Gambar 2.1 (Sapei *et. al.*, 1992), menunjukkan bahwa wilayah Desa Kamal merupakan bagian dari Pegunungan Iyang-Argopuro tepatnya Breksi Argopuro. Pegunungan Iyang-Argopuro secara regional termasuk dalam sistem tektonik Jawa Timur, yang berkembang menunjukkan bentuk diagonal dengan arah Barat Laut-Tenggara dan Timur Laut-Barat Daya (Chaniago dan Yuhan, 1995). Mayoritas hilir Pegunungan Argopuro tersusun oleh tanah aluvial (*Alluvium*) dimana tanah aluvial (*Alluvium*) sendiri memiliki kandungan mineral yang cukup tinggi karena tanah aluvial (*Alluvium*) memiliki sifat mudah menyerap air sehingga banyak sekali mineral

dan air yang terjebak di dalamnya. Batuan Pegunungan Iyang-Argopuro terdiri dari batuan piroklastik, andesit, andesit basaltik, basalt, disebutkan pula batuan tersebut termasuk di dalam Sub-Alkalin. Karakteristik dari formasi ini mempunyai porositas dan permeabilitas rendah serta kedap air. Tipikal air tanah yang dipakai oleh masyarakat di kawasan ini adalah air tanah dangkal (freatis) yang merupakan air tanah oleh tangkapan air setempat (*Local Catchment Area*) dengan cadangan sangat terbatas. Air tanah dangkal biasanya berada di kedalaman kurang dari 40 meter. Air tanah ini bergerak dari tempat yang tinggi ke tempat yang lebih rendah. Oleh karena itu, di daerah yang lebih rendah, potensi air tanahnya relatif lebih tinggi dibandingkan di daerah puncak bukit atau gunung. Hal tersebut terjadi karena air hujan yang masuk ke dalam tanah akan bergerak ke wilayah yang lebih rendah (Christine, 2012).



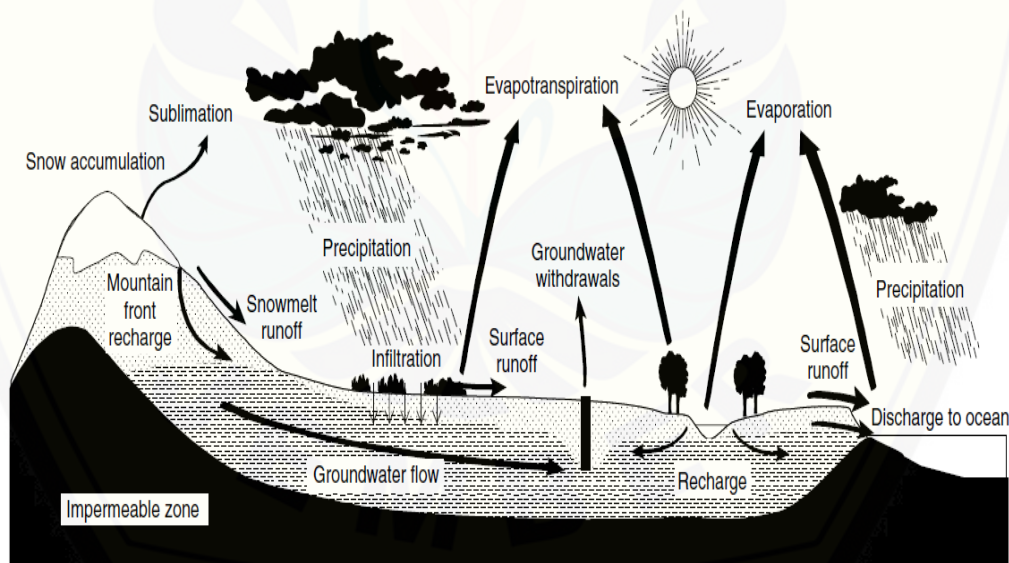
Gambar 2.1 Peta geologi lembar Arjasa, Jember (Sapei *et. al.*, 1992)

## 2.2 Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi berawal dari air yang berasal dari permukaan tanah dan laut yang menguap ke udara, berubah menjadi awan setelah melalui beberapa

proses dan kemudian jatuh kembali ke permukaan laut atau daratan sebagai hujan atau salju. Sebelum mencapai permukaan bumi sebagian langsung menguap ke udara dan sebagian mencapai permukaan bumi. Tidak semua bagian hujan yang jatuh ke permukaan bumi mencapai permukaan tanah. Sebagian akan tertahan oleh tumbuh-tumbuhan kemudian menguap dan sebagian lagi akan jatuh atau mengalir melalui dahan-dahan ke permukaan tanah (Sosrodarsono dan Takeda, 1993).

Menurut Asdak (1995), siklus hidrologi menunjukkan gerakan air di permukaan bumi. Selama berlangsungnya siklus hidrologi, yaitu perjalanan air dari permukaan laut menuju atmosfer kemudian ke permukaan tanah dan kembali lagi ke laut yang bersifat kontinu, air akan tertahan sementara di sungai, danau/waduk, dalam tanah. Air yang tertahan sementara ini dapat dimanfaatkan oleh manusia dan makhluk hidup lain. Siklus Hidrologi ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram skematis dari berbagai fluks dalam siklus hidrologi (Pagano dan Sorooshian, 2002)

Perjalanan air dimulai dari penguapan air laut dan daratan ke atmosfer melalui proses evaporasi, dari tumbuhan melalui proses transpirasi dan gabungan dari keduanya yang disebut proses evapotranspirasi. Uap air yang terbentuk dari



proses evaporasi, transpirasi dan evapotranspirasi tersebut membentuk awan setelah mencapai temperatur titik kondensasi dan jatuh ke permukaan bumi dalam bentuk air hujan atau salju. Sebelum mencapai permukaan, sebagian air akan tertahan oleh tumbuh-tumbuhan, sebagian lagi mencapai permukaan tanah melalui sela-sela daun atau mengalir melalui permukaan batang pohon. Sebagian air hujan tidak pernah sampai ke permukaan tanah karena ter-evaporasi kembali ke atmosfer selama dan setelah berlangsungnya hujan. Air hujan yang masuk ke dalam tanah akan tertampung sementara dalam cekungan-cekungan permukaan tanah dan mengalir melalui tanah sebagai aliran bawah permukaan yang kemudian dibuang sebagai limpasan permukaan (*surface runoff*). Air yang masuk dapat meresap lebih dalam untuk mengisi ulang air tanah yang pada akhirnya air tanah mengalir ke sungai dan menuju laut (Todd, 1995).

### 2.3 Sumber Daya Air

Indonesia merupakan salah satu dari 10 negara dengan sumber daya air yang melimpah, namun dalam pemanfaatannya terdapat permasalahan mendasar yang terjadi. Variasi iklim serta kerentanan sistem sumberdaya air terhadap perubahan iklim global memperparah status krisis air. Pada musim hujan, beberapa daerah di Indonesia mengalami kelimpahan air yang luar biasa banyak bahkan sampai mengakibatkan banjir dan kerusakan lain. Sementara itu, pada musim kemarau banyak daerah Indonesia yang mengalami kekurangan air bahkan kekeringan. Permasalahan mendasar kedua adalah karena terbatasnya jumlah air yang dapat dieksplorasi dan dikonsumsi, sedangkan jumlah penduduk Indonesia yang terus bertambah menyebabkan kebutuhan air meningkat secara drastis (Asra, 2012).

Air di muka bumi ini akan selalu ada karena air tidak akan pernah berhenti bersirkulasi. Ketika jumlah penduduk masih belum meningkat drastis dan alam masih belum banyak tereksploitasi, air terasa berlimpah sepanjang waktu dengan kualitas yang baik, dan ketika itu juga air terasa belum memiliki nilai yang tinggi. Ketika ketersediaan air semakin terbatas, sedangkan kebutuhan manusia akan air semakin meningkat, serta kualitas alam mulai terganggu, saat itu juga nilai air

mulai meningkat. Air tidak hanya berfungsi sosial dan lingkungan tetapi juga memiliki nilai ekonomis (Sosrodarso dan Takeda, 1993).

Menurut Arsyad (2000), konversi air pada prinsipnya adalah penggunaan air yang jatuh ke tanah untuk memenuhi kebutuhan manusia seefisien mungkin dengan pemanfaatan sumberdaya air yang baik sehingga tidak terjadi banjir pada musim hujan dan kekeringan pada musim kemarau. Setiap perlakuan manusia di bumi terhadap pengolahan tanah akan berpengaruh terhadap tata air di wilayah tersebut. Oleh karena itu, pemanfaatan sumberdaya air harus dilakukan dengan teratur dan terencana dengan baik. Potensi cekungan air tanah di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Table 2.1 Potensi cekungan air tanah

No.	Pulau	Cekungan		
		Jumlah	Luas ( $km^2$ )	Volume (Milyar $m^3$ )
1	Sumatera	65	270.656	109,929
2	Jawa	80	80.939	41,334
3	Kalimantan	22	209.971	68,473
4	Bali	8	4.381	1,598
5	Nusa Tenggara	47	41.425	10,139
6	Sulawesi	91	37.768	20,244
7	Maluku	68	25.830	13,174
8	Papua	16	52.662	43,400
	Total	397	723.629	308,228

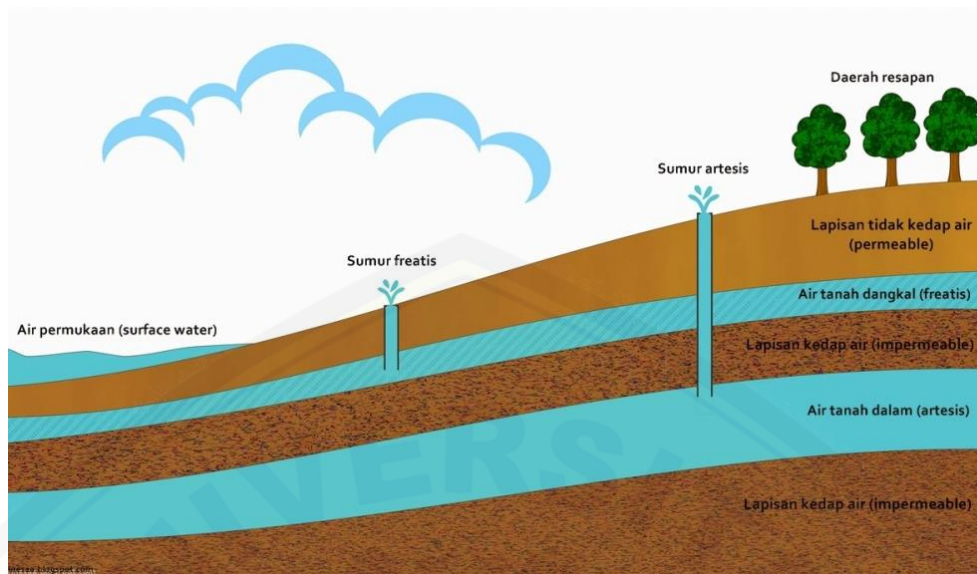
(Sumber : Kementerian Lingkungan Hidup, 2008)

Ketersediaan air di Indonesia mencapai 694 milyar meter kubik per tahun. Jumlah ini pada dasarnya merupakan potensi yang dapat dimanfaatkan dengan baik, namun faktanya saat ini baru 23% yang sudah dimanfaatkan dan hanya sekitar 20% dari yang dimanfaatkan tersebut digunakan untuk memenuhi kebutuhan air baku rumah tangga, kota, dan industri. Sementara itu 80% lainnya dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan irigasi (Hartoyo, 2010).

## 2.4 Air Tanah

Air tanah adalah air yang bergerak dalam tanah. Air tanah berdasarkan keberadaannya dibagi menjadi dua macam. Pertama, air tanah yang terdapat di dalam ruang-ruang antara butir-butir tanah disebut air lapisan. Kedua, air tanah yang terdapat di dalam retak-retak dari batuan disebut air celah (*fissure water*) (Sosrodarsono dan Takeda, 1993). Air tanah terbentuk dalam beberapa jenis formasi geologis, yang paling utama dikenal sebagai akuifer. Air tanah berdasarkan sumbernya dibagi menjadi 4 macam, yaitu air meteorik (*meteoric water*), air juvenil (*juvenile water*), air rejuvenil (*rejuvenile water*), dan air konat (*connate water*). Air meteorik adalah air tanah yang berasal dari atmosfer yang mencapai kejenuhan baik secara langsung oleh peresapan air permukaan dan secara tidak langsung oleh permukaan influen (kemiringan muka air tanah menyusup di bawah arus air permukaan) danau, sungai, saluran buatan, dan lautan. Air juvenil adalah air tanah yang berasal dari aktivitas magma di dalam kerak bumi karena adanya unsur hidrogen dan oksigen yang menyusun magma. Air rejuvenil adalah air yang untuk sementara waktu dikeluarkan dari siklus hidrologi oleh pelapukan maupun oleh sebab-sebab lain, kemudian kembali ke siklus lagi dengan proses-proses metamorfosis. Air konat adalah air yang terjebak selama proses pembentukan batuan sedimen. Air ini biasanya sudah tereminalisasi dan memiliki salinitas yang lebih tinggi dibanding air laut (Todd, 1995).

Air tanah berdasarkan tingkat kedalaman dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu air tanah dangkal dan air tanah dalam. Air tanah dangkal adalah air tanah yang terletak di atas lapisan batuan kedap air (*aquiclude*) dan air tanah dangkal sering disebut air tanah freatis. Air tanah dangkal biasanya berada di kedalaman kurang dari 40 m. Sedangkan air tanah dalam adalah air tanah yang terletak diantara dua lapisan yang kedap air (*aquiclude*) dan air tanah dalam biasa disebut air tanah artesis. Air tanah dalam biasanya berada di kedalaman lebih dari 40 m (Soekamto, 1995). Skema air tanah dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 3.3 Skema lapisan air tanah (Istiqamah, 2018)

## 2.5 Akuifer

Akuifer merupakan formasi-formasi batuan yang terdiri dari lapisan *permeable* jenuh yang cukup untuk menghasilkan sejumlah besar air ke sumur dan mata air. Secara umum akuifer termasuk bagian yang tak jenuh (reservoir air) dari unit *permeabel*. Akuifer umumnya luas dan ditindih oleh lapisan pengikat yang merupakan lapisan *impermeable* (tidak tembus air). Lapisan *impermeable* terdiri dari dua jenis yakni lapisan kedap air (*aquiclude*) dan lapisan kebal air (*aquifuge*) (Todd, 1995). Berdasarkan litologinya, akuifer dapat dikelompokkan menjadi 4 macam, yaitu (Kodoati dan Sjarief, 2012) :

a. Akuifer Bebas atau Akuifer Tidak Tertekan (*Unconfined Aquifer*)

Akuifer bebas adalah akuifer yang lapisan pembatasnya (*aquitard*) hanya pada bagian bawah saja dan tidak ada lagi sekat dengan atasnya, yaitu pada muka air tanah. Air tanah dalam akuifer ini tertutup lapisan *impermeable*. Permukaan air tanah di sumur dan air tanah bebas adalah permukaan air bebas, maka permukaan air tanah bebas adalah batas antara zona yang jenuh. Akuifer ini disebut juga *phriatic aquifer* atau *free aquifer*.



b. Akuifer Tertekan (*Confined Aquifer*)

Akuifer tertekan adalah akuifer yang pembatas pada lapisan atas dan bawahnya merupakan pembatas yang tidak tembus air. Kondisi ini menyebabkan air muncul di atas formasi tertekan pada bagian bawahnya sehingga akuifer ini terisi penuh oleh air tanah. Akuifer ini memiliki tekanan jenuh lebih besar dari tekanan atmosfer.

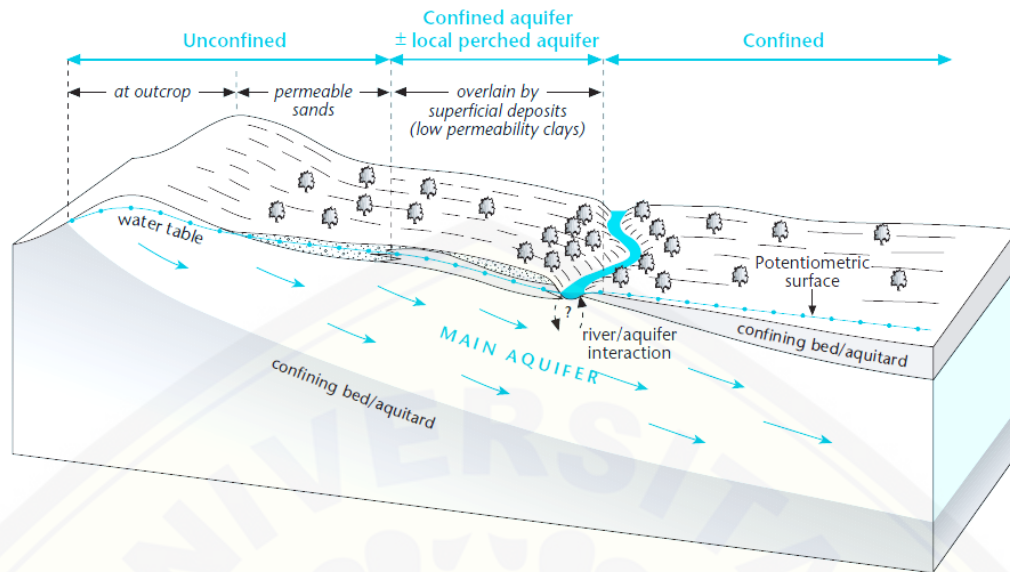
c. Akuifer Semi Tertekan (*Leakage Aquifer*)

Akuifer semi tertekan adalah akuifer yang memiliki air yang jenuh dan dibatasi oleh lapisan atas (*aquitard*) dan lapisan bawah (*aquiclude*). Jenis akuifer ini memiliki lapisan atas dan bawah yang merupakan lapisan semi-lolos air. Akuifer ini terletak antara akuifer bebas dan akuifer tertekan.

d. Akuifer Melayang (*Perched Aquifer*)

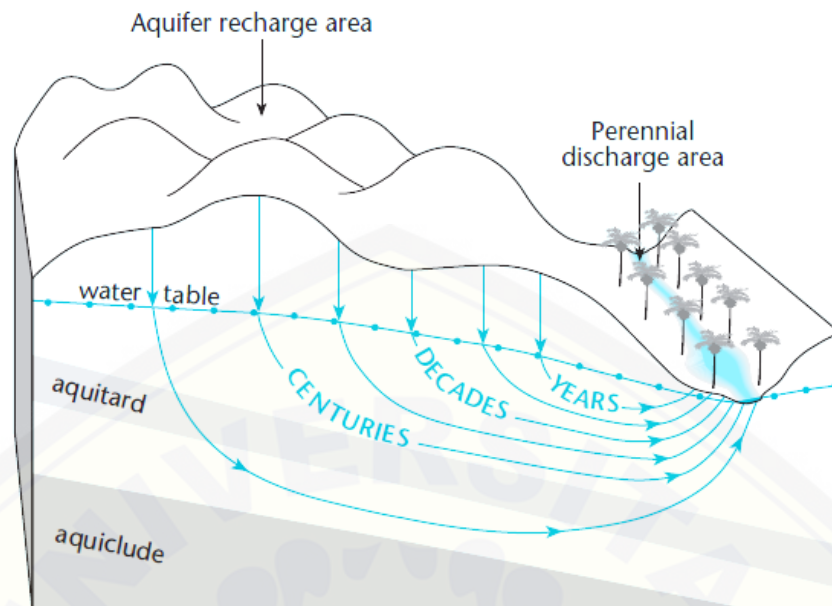
Akuifer melayang adalah akuifer dimana dalam zona aerasi terbentuk sebuah akuifer yang terdapat di atas lapisan *impermeable*. Akuifer melayang ini tidak dapat dijadikan sebagai suatu usaha pengembangan air tanah karena mempunyai variasi permukaan air dan volumenya yang besar. Akuifer ini merupakan peralihan antara akuifer tertekan dengan akuifer bebas.

Menurut Morris *et al.* (2002) semua air tanah pasti memiliki sumber resapan yang biasanya berasal dari hujan atau pencairan salju, namun bisa juga dari rembesan sungai, danau atau kanal dan lain-lain. Pengisian ulang biasanya bergerak ke bawah melalui zona tak jenuh dan akuifer mengisi sampai air mencapai permukaan tanah, dimana ia mengalir dari tanah sebagai mata air atau rembesan, memberikan aliran dasar dari sungai dataran rendah. Dengan demikian akuifer menjadi jenuh ke tingkat dimana alirannya cocok mengisi ulang. Akuifer dangkal di daerah resapan umumnya tidak terbatas, tetapi di tempat lain dan pada kedalaman yang lebih besar, sebagian air tanah sering dibatasi oleh strata permeabilitas rendah (*aquitard*) atau sepenuhnya dibatasi oleh lapisan atas yang tidak tembus air (*aquiclude*). Dalam kondisi terbatas, air mungkin mengalami tekanan dan ketika sumur dibor, maka akan naik ke bagian atas akuifer, bahkan sejauh permukaan tanah hingga ke tingkat yang disebut permukaan potensiometri (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Skema situasi akuifer yang umum (Morris et al., 2002)

Sistem air tanah bersifat dinamis dan air secara terus menerus bergerak lambat dari gradien area resapan ke area pembuangan. Dalam sistem akuifer besar, puluhan atau bahkan ratusan tahun dapat berlalu dalam saluran air melalui bagian bawah tanah dari siklus hidrologi (Gambar 2.5). Laju aliran air biasanya tidak melebihi beberapa meter per hari dan dibandingkan dengan laju aliran sungai yang bisa mencapai hingga 1 m/s. Kecepatan dapat jauh lebih tinggi di mana aliran melalui sistem fraktur, tergantung pada faktor-faktor seperti *aperture* atau kepadatan jaringan fraktur. Dengan demikian persediaan yang terletak di akuifer yang berbeda, atau di bagian yang berbeda dari akuifer yang sama, dapat memanfaatkan air dari waktu tinggal yang sangat berbeda. Ini adalah faktor penting untuk kontaminan yang terdegradasi dari waktu ke waktu dan dalam pengendalian mikroorganisme penyebab penyakit seperti beberapa bakteri, virus, dan protozoa (Morris *et al.*, 2002).



Gambar 2.5 Sistem aliran air tanah di akuifer besar (Morris et al., 2002)

## 2.6 Porositas dan Permeabilitas

Porositas merupakan ukuran ruang-ruang kosong dalam suatu tanah atau batuan. Secara definitif porositas merupakan perbandingan antara volume ruang yang terdapat dalam batuan yang berupa pori-pori terhadap volume batuan secara keseluruhan dan nilai porositas biasanya dinyatakan dalam persen. Ukuran suatu batuan akan menentukan kapasitas penyimpanan fluida reservoir (Christine, 2012). Pori merupakan ruang di dalam batuan selalu terisi oleh fluida, seperti air tawar atau asin, udara, atau gas bumi. Porositas efektif adalah apabila bagian rongga pori-pori di dalam batuan berhubungan.

Menurut Irham *et al.* (2006) porositas berdasarkan waktu dan proses terjadinya diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu :

- a. Porositas primer merupakan porositas yang terjadi bersamaan dengan batuan berubah menjadi sedimen.
- b. Porositas sekunder merupakan porositas yang terjadi sesudah batuan berubah menjadi sedimen yang bisa berupa larutan (*dissolution*).

Permeabilitas ( $k$ ) merupakan kemampuan medium berpori untuk meloloskan atau mengalirkan fluida. Tanah atau batuan yang memiliki

permeabilitas tinggi, mampu meningkatkan laju infiltrasi sehingga menurunkan laju air di dalam tanah. Permeabilitas sangat penting untuk menentukan besarnya cadangan fluida yang dapat diproduksi (Irham *et al.*, 2006).

## 2.7 Sifat Kelistrikan Batuan dan Mineral

Sifat kelistrikan batuan adalah kelistrikan batuan jika dialirkan arus kedalamnya. Aliran arus listrik dipengaruhi oleh porositas batuan dan dipengaruhi oleh air yang terperangkap dalam pori-pori batuan. Aliran listrik di dalam batuan dan mineral dapat digolongkan menjadi tiga macam, yaitu konduksi elektronik, konduksi elektrolit, dan konduksi dielektrik (Telford *et. al.*, 1990).

### 2.7.1 Konduksi Elektronik

Konduksi elektronik terjadi jika batuan dan mineral tersebut mempunyai banyak elektron bebas. Akibatnya arus listrik mudah mengalir pada batuan ini. Aliran arus listrik ini juga dipengaruhi oleh sifat atau karakteristik masing-masing batuan yang dilewatinya. Salah satu sifat atau karakteristik batuan adalah resistivitas (tahanan jenis). Resistivitas adalah karakteristik bahan yang menunjukkan kemampuan bahan tersebut untuk menghantarkan arus listrik. Semakin besar nilai resistivitas suatu batuan, maka semakin sulit batuan tersebut menghantarkan arus listrik. Begitu pula sebaliknya, apabila semakin kecil nilai resistivitas suatu batuan, maka semakin mudah pula batuan tersebut untuk menghantarkan arus listrik (Telford *et. al.*, 1990).

### 2.7.2 Konduksi Elektrolit

Sebagian besar batuan merupakan konduktor yang buruk dan memiliki resistivitas yang tinggi. Konduksi elektrolit banyak terjadi pada batuan atau materi yang bersifat porus dan pada pori-pori tersebut terisi oleh larutan elektrolit. Batuan-batuan tersebut menjadi konduktor elektrik, dimana konduksi arus listrik dibawa oleh ion-ion elektrolit dalam air. Konduktivitas dan resistivitas batuan porus bergantung pada volume dan susunan pori-porinya. Konduktivitas akan semakin besar jika kandungan dalam batuan bertambah banyak. Begitu pula

sebaliknya, resistivitas akan semakin besar jika kandungan air dalam batuan berkurang (Telford *et. al.*, 1990).

### 2.7.3 Konduksi Dielektrik

Konduksi dielektrik terjadi pada batuan yang bersifat dielektrik, artinya batuan tersebut mempunyai elektron bebas sedikit bahkan tidak sama sekali. Namun dikarenakan adanya pengaruh medan listrik dari luar, maka elektron-elektron dalam atom batuan dipaksa berpindah dan berkumpul terpisah dengan intinya sehingga terjadi polarisasi. Peristiwa ini tergantung pada konduksi dielektrik masing-masing batuan yang bersangkutan (Telford *et. al.*, 1990).

## 2.8 Resistivitas Batuan

Batuan adalah material yang mempunyai daya hantar listrik dan harga tahanan jenis tertentu. Batuan yang sama belum tentu mempunyai nilai resistivitas yang sama. Sebaliknya nilai resistivitas yang sama bisa dimiliki oleh batuan-batuan yang berbeda, hal ini terjadi karena nilai resistivitas batuan memiliki rentang nilai yang bisa saling tumpang tindih (Permatasari, 2016). Resistivitas juga merupakan perbandingan antara kuat medan listrik dengan rapat arus, dengan teori arus dapat mengalir bila ada beda potensial atau diberikan medan listrik (dalam suatu konduktor). Variasi nilai – nilai resistivitas batuan dan mineral bumi dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai resistivitas batuan dan mineral bumi

Material	Resistivitas pada 20°C ( $\Omega\text{m}$ )
Udara	0
Air asin	0,2
Air Tanah	0,5 – 300
Lempung	1 – 100
Pasir	1 – 1000
Tembaga	1 – 1,7
Magnesium	4,2
Bijih Besi	0,1 – 25
Khrom	13,2
Aluvium	10 – 800
Kerikil	100 – 600
Batu Pasir	200 – 8000
Gamping	50 – $1 \times 10^7$



Karbon	3000
Batuan Garam	$30 - 1 \times 10^{13}$
Kwarsa	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Andesit	$1,7 \times 10^2 - 4,5 \times 10^4$

(Sumber : Telford *et. al.*, 1990)

## 2.9 Metode Geolistrik Resistivitas

Metode geolistrik resistivitas digunakan untuk mempelajari keadaan bawah permukaan dengan cara mempelajari sifat aliran listrik di dalam batuan di bawah permukaan bumi berdasarkan perbedaan resistivitas batuan. Pada metode geolistrik resistivitas arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi melalui empat buah elektroda, yakni dua buah elektroda potensial dan dua buah elektroda arus (Reynolds, 1997). Metode geolistrik resistivitas menggunakan arus listrik DC (*Direct Current*) dengan injeksi langsung melalui elektroda di permukaan tanah. Metode geolistrik resistivitas menghasilkan variasi perubahan nilai resistivitas (distribusi resistivitas) baik ke arah horizontal maupun ke arah vertikal. Metode geolistrik resistivitas akan sangat efektif bila digunakan untuk eksplorasi yang sifatnya dangkal. Metode ini hanya bisa menjangkau secara efektif hingga kedalaman (300 – 460) m. Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan dalam eksplorasi reservoir air (akuifer) dan dalam eksplorasi panas bumi (*geothermal*), namun dengan keterbatasan penetrasi tersebut metode ini jarang digunakan untuk eksplorasi minyak (Telford *et al.*, 1990).

Berdasarkan teknik pengukuran geolistrik, dikenal dua teknik pengukuran, yakni metode geolistrik resistivitas *mapping* dan *sounding (drilling)*. Metode geolistrik resistivitas *mapping* merupakan pengukuran perubahan resistivitas bawah permukaan secara lateral (horizontal). *Mapping* ini dapat dilakukan dengan cara berpindah titik pengukuran, namun mempertahankan jarak antar elektroda arus dan potensial. Konfigurasi elektroda yang umum digunakan adalah konfigurasi *Wenner* atau *Dipole-Dipole*. Metode geolistrik resistivitas *sounding* merupakan pengukuran perubahan resistivitas bawah permukaan pada arah vertikal. Hal ini dapat dilakukan dengan cara mengubah/membuat variasi jarak antar elektroda arus dan potensial, pada titik pengukuran yang sama. Perubahan jarak elektroda dilakukan dari jarak elektroda kecil kemudian membesar secara

gradual. Jarak elektroda ini sebanding dengan kedalaman lapisan batuan yang terdeteksi. Semakin besar jarak antar elektroda, semakin dalam lapisan batuan yang terdeteksi. Konfigurasi elektroda yang umum digunakan adalah konfigurasi *Schlumberger*. Pada pengukuran di lapangan, pembesaran jarak antar elektroda dapat dilakukan jika menggunakan alat geolistrik yang memadai. Dalam hal ini alat tersebut harus dapat menghasilkan arus yang besar atau arus yang cukup sensitif dalam mendeteksi beda potensial yang kecil di dalam bumi. Oleh karena itu, alat geolistrik yang baik adalah alat yang dapat menghasilkan arus listrik yang cukup besar dan mempunyai sensitivitas tinggi (Reynolds, 1997).

Metode geolistrik pada dasarnya digunakan untuk mengetahui perubahan resistivitas lapisan batuan di bawah permukaan tanah dengan cara mengalirkan arus listrik DC (*Direct Current*) yang kemudian dialirkan ke bawah permukaan tanah melalui kontak dua elektroda arus, kemudian distribusi potensial yang dihasilkan diukur melalui dua elektroda potensial. Setelah besar arus dan besar potensial yang dihasilkan terukur, maka resistivitas bawah permukaan dapat dihitung, sehingga untuk mengetahui struktur bawah permukaan yang lebih dalam, maka spasi masing-masing elektroda arus dan elektroda potensial ditambah secara bertahap. Semakin besar spasi elektroda maka efek penembusan arus ke bawah permukaan bumi semakin dalam. Hubungan antara rapat arus dan intensitas medan listrik dengan Hukum Ohm adalah sebagai berikut :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.1)$$

dimana  $J = \frac{I}{A} =$  Rapat arus ( $A/m^2$ )

$\sigma =$  Konduktivitas medium(S/m)

$E = \frac{V}{L} =$  Intensitas medan listrik(N/C)

Berdasarkan Persamaan (2.1) diperoleh persamaan umum resistivitas suatu medium homogen, yakni :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = R \frac{A}{L} \quad (2.2)$$



dimana  $\rho =$  Resistivitas material ( $\Omega\text{m}$ )

$L =$  Panjang (m)

$R =$  Tahanan yang diukur ( $\Omega$ )

$A =$  Luas penampang ( $\text{m}^2$ )

karena  $R = \frac{\Delta V}{I}$ , maka diperoleh Persamaan (2.3):

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (2.3)$$

dimana  $\Delta V =$  Beda potensial (V)

$I =$  Kuat arus yang dilalui oleh bahan (A)

### 2.9.1 Titik Arus Tunggal di Permukaan

Metode pendekatan yang paling sederhana dalam mempelajari secara teoritis tentang aliran arus listrik di dalam bumi adalah bumi dianggap homogen dan isotropis (Telford *et al.*, 1990). Jika sebuah elektroda tunggal yang dialiri arus listrik diinjeksikan pada permukaan bumi yang homogen isotropis, maka akan terjadi aliran arus yang menyebar dalam tanah secara radial dan apabila udara di atasnya memiliki konduktivitas nol, maka garis potensialnya akan berbentuk setengah bola dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Aliran arus yang keluar dari titik sumber membentuk medan potensial dengan kontur ekipotensial berbentuk permukaan setengah bola di bawah permukaan. Dalam hal ini, arus mengalir melalui permukaan setengah bola maka arus yang mengalir melewati permukaan tersebut adalah:

$$I = 2\pi r^2 J = -2\pi r^2 \sigma \frac{dV}{dr} = -2\pi \sigma A \quad (2.4)$$

dimana  $J =$  Rapat arus listrik  $= -\sigma \frac{dV}{dr}$  dan  $\frac{dV}{dr} = \frac{A}{r^2}$

untuk konstanta integrasi A dalam setengah bola yakni :

$$A = -\frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.5)$$

sehingga diperoleh :

$$V = -\frac{A}{r} \left( \frac{I\rho}{2\pi} \right) \frac{1}{r} \quad (2.6)$$

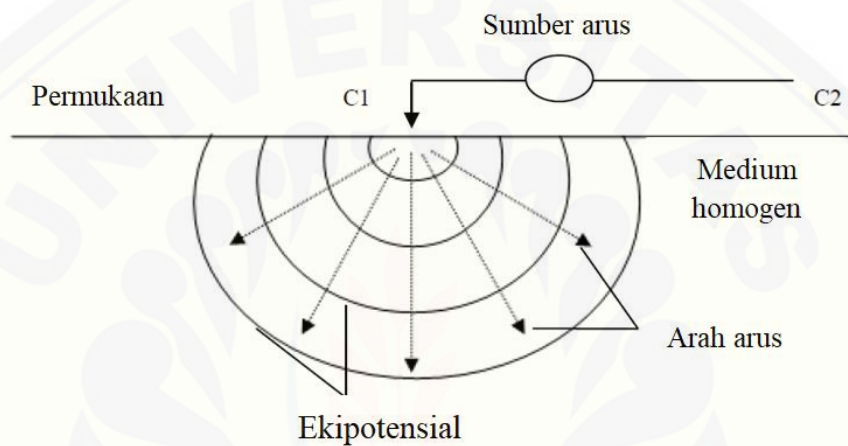
dimana  $\Delta V =$  Beda potensial (V)

$I =$  Kuat arus yang dilalui oleh bahan (A)

maka nilai resistivitas listrik yang diberikan oleh medium :

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) merupakan persamaan ekipotensial permukaan setengah bola yang tertanam dibawah permukaan tanah (Telford *et. al.*, 1990). Pola aliran arus dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut :



Gambar 2.6 Sumber arus berupa titik pada permukaan bumi homogen (Telford *et. al.*, 1990)

### 2.9.2 Dua Titik Arus di Permukaan

Apabila terdapat elektroda arus  $C_1$  yang terletak pada permukaan suatu medium homogen, terangkai dengan elektroda arus  $C_2$  dan diantaranya ada dua elektroda potensial  $P_1$  dan  $P_2$  yang dibuat dengan jarak tertentu seperti pada (Gambar 2.7), maka potensial yang berada di dekat titik elektroda tersebut bisa dipengaruhi oleh kedua elektroda arus. Oleh karena itu, potensial  $P_1$  yang disebabkan arus  $C_1$  adalah :

$$V_1 = -\frac{A_1}{r_1} \quad (2.8)$$

dimana :

$$A_1 = -\frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.9)$$

Karena arus pada kedua elektroda adalah sama dan arahnya berlawanan, maka potensial  $P_1$  yang disebabkan  $C_2$  adalah :

$$V_2 = -\frac{A_2}{r_2} \quad (2.10)$$

dimana :

$$A_2 = -A_1 = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.11)$$

Jika didapatkan potensial total di  $P_1$  :

$$V_1 + V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.12)$$

dengan cara yang sama diperoleh potensial di  $P_2$  yakni :

$$V_1 + V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (2.13)$$

sehingga dapat diperoleh beda potensial antara titik  $P_1$  dan  $P_2$  yakni :

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (2.14)$$

dimana  $\Delta V =$  Beda potensial antara  $P_1$  dan  $P_2$

$I =$  Arus (A)

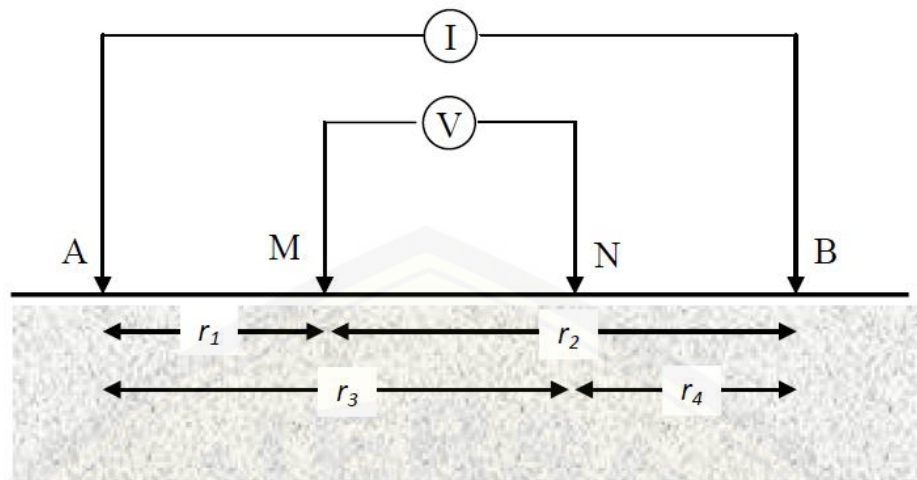
$\rho =$  Resistivitas ( $\Omega\text{m}$ )

$r_1 =$  Jarak  $C_1$  ke  $P_1$  (m)

$r_2 =$  Jarak  $C_2$  ke  $P_1$  (m)

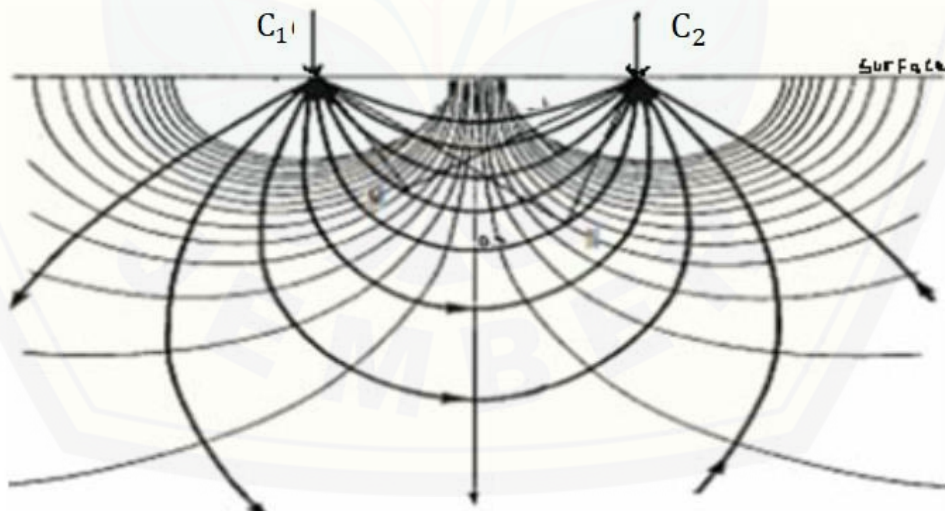
$r_3 =$  Jarak  $C_1$  ke  $P_2$  (m)

$r_4 =$  Jarak  $C_2$  ke  $P_2$  (m)



Gambar 2.7 Dua pasang elektroda arus dan elektroda potensial pada permukaan medium homogen isotropis dengan resistivitas  $\rho$  (Telford et. al., 1990)

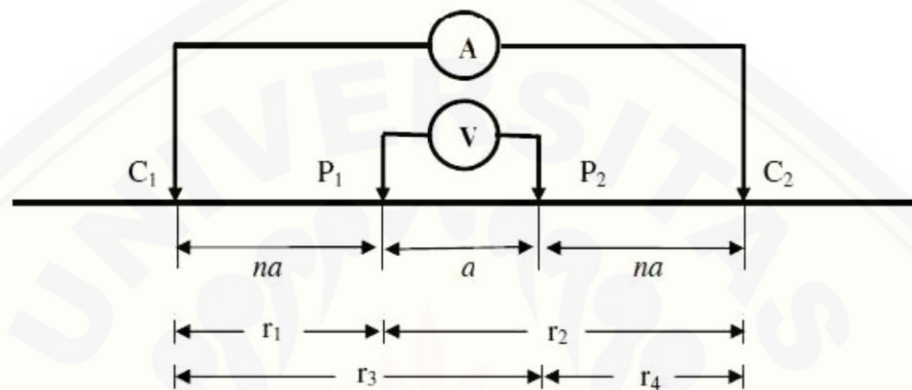
Susunan keempat elektroda di atas merupakan susunan elektroda dalam metode geolistrik resistivitas. Pada konfigurasi ini garis-garis aliran arus dan ekipotensial diubah oleh dekatnya kedua elektroda arus. Perubahan dari garis-garis ekipotensial yang melingkar lebih jelas pada daerah antara dua elektroda arus sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.8 (Reynolds, 1997).



Gambar 2.8 Pola aliran arus dan bidang ekipotensial antara dua elektroda arus dengan polaritas berlawanan (Reynolds, 1997)

### 2.10 Konfigurasi *Wenner-Schlumberger*

Menurut Sakka (2002), konfigurasi *Wenner-Schlumberger* dilakukan dengan jarak spasi antar elektroda  $C_1 - P_1, C_2 - P_2, P_1 - P_2$  bernilai sama yaitu “n” seperti Gambar 2.9. Jika spasi antar elektroda potensial ( $P_1$  dan  $P_2$ ) adalah  $a$  maka jarak spasi antar elektroda arus adalah  $2na + a$ . Keempat elektroda tersebut diletakkan dalam satu garis lurus.



Gambar 2.9 Spasi antar elektroda pada konfigurasi *Wenner-Schlumberger* (Sakka, 2002)

Metode geolistrik konfigurasi *Wenner-Schlumberger* merupakan gabungan antara konfigurasi *Wenner* dan *Schlumberger*. Konfigurasi ini digunakan dalam eksplorasi yang sifatnya relatif dangkal. Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* adalah salah satu konfigurasi paling umum digunakan untuk survei resistivitas 2D. Kedalaman rata-rata pada konfigurasi ini 10% lebih besar dari konfigurasi *Wenner*. Konfigurasi ini memiliki kedalaman semu sebesar  $1/3$  dari bentangan elektroda arus (Loke, 2000). Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* juga memiliki cakupan horizontal sedikit lebih baik dibandingkan dengan konfigurasi *Wenner*. Cakupan data horizontal lebar dari konfigurasi *Wenner*, tetapi lebih sempit dari data yang diperoleh konfigurasi *Dipole-Dipole* (Telford *et al.*, 1990). Berdasarkan jarak spasi antar elektroda, faktor geometri konfigurasi *Wenner-Schlumberger* menjadi:

$$K = \pi(n + 1)a \quad (2.15)$$



sehingga resistivitas semu untuk konfigurasi *Wenner-Schlumberger* adalah

$$\rho_a = \pi n(n+1)a \frac{\Delta V}{I} \quad (2.16)$$

### 2.11 Resistivitas Semu (*Apparent Resistivity*)

Pada prinsipnya, pengukuran metode geolistrik resistivitas dilakukan dengan mengalirkan arus melalui elektroda  $C_1$  dan  $C_2$  dan pengukuran beda potensial pada  $P_1$  dan  $P_2$ . Jika diasumsikan bahwa bumi homogen isotropis, maka tahanan jenis yang diperoleh adalah tahanan jenis yang sebenarnya dan tidak tergantung pada spasi elektroda. Namun, pada kenyataannya bumi tersusun atas lapisan-lapisan dengan resistivitas yang berbeda-beda, sehingga potensial yang terukur merupakan pengaruh lapisan-lapisan tersebut. Harga resistivitas yang diukur seolah-olah merupakan harga resistivitas untuk satu lapisan saja, sehingga resistivitas yang terukur adalah resistivitas semu (Reynolds, 1997).

Berdasarkan persamaan (2.16) besar resistivitas semu dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$\rho_a = 2\pi \left[ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]^{-1} \frac{\Delta V}{I} \quad (2.17)$$

atau

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.18)$$

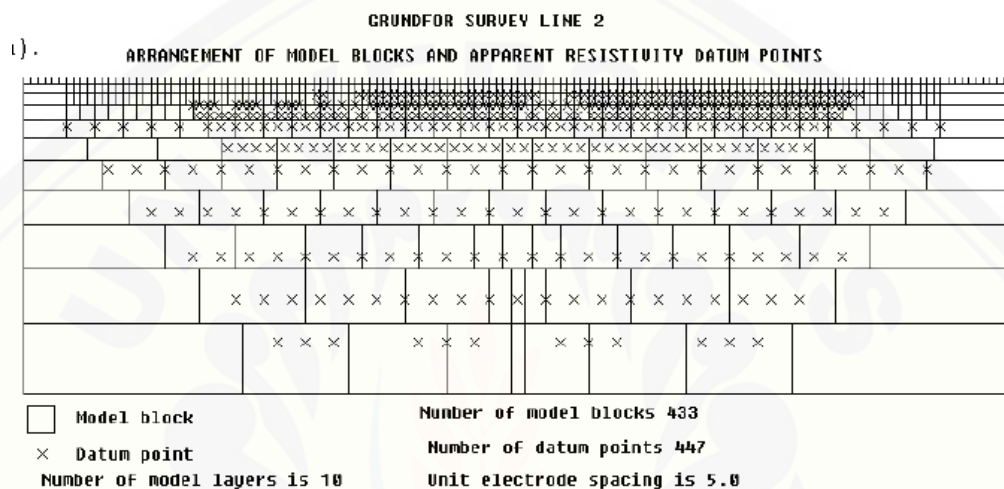
dengan

$$K = \frac{2\pi}{\left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}} \quad (2.19)$$

dimana  $K$  adalah faktor geometri yaitu besaran koreksi letak kedua elektroda potensial terhadap letak kedua elektroda arus. Dengan mengukur  $\Delta V$  dan  $I$  maka dapat ditentukan harga resistivitas  $\rho_a$  (Reynolds, 1997).

## 2.12 Aplikasi *Res2Dinv* dan *Voxler*

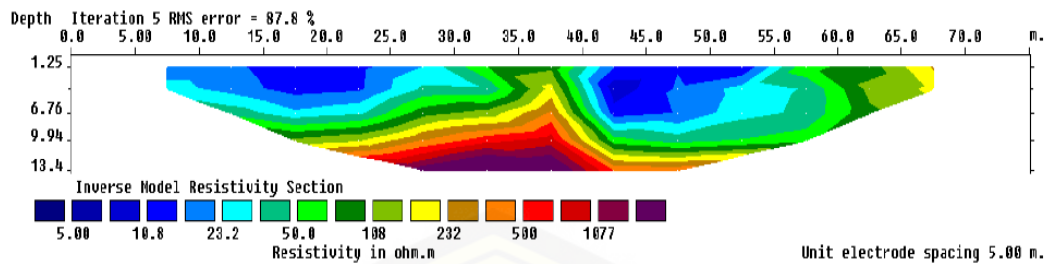
Hasil resistivitas semu yang diperoleh dari pengukuran data lapangan menggunakan metode geolistrik diinversi agar mendapatkan nilai resistivitas yang sesungguhnya. Data hasil pengukuran di lapangan akan menghasilkan nilai datum yang berbeda di tengah potensial seperti Gambar 2.10. Data tersebut diinversi menggunakan aplikasi *Res2Dinv* sehingga didapatkan penampang 2D.



Gambar 2.10 Penampang 2D datum hasil pengukuran (Loke, 2000)

### 2.12.1 *Res2Dinv*

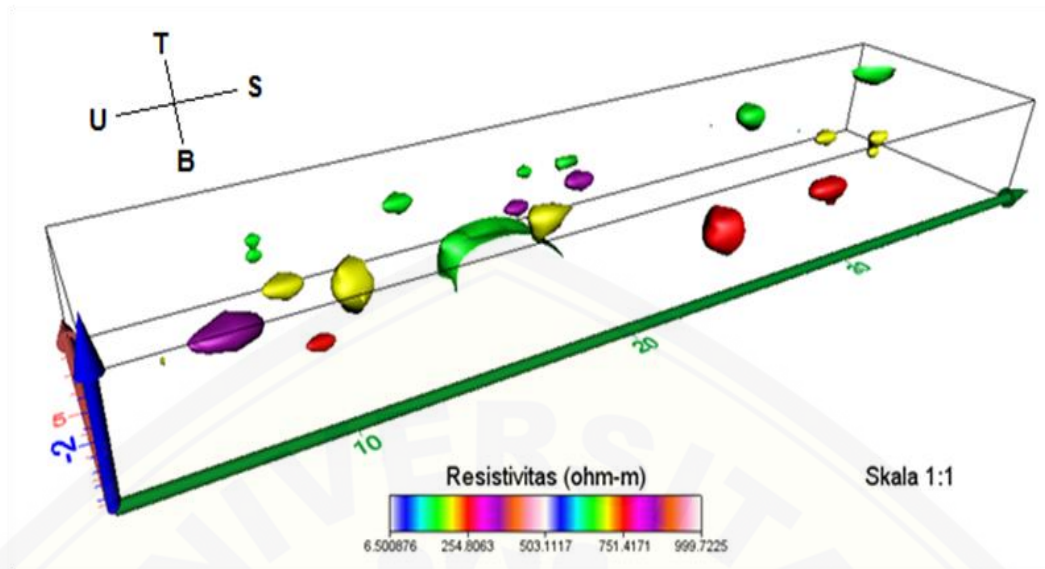
*Res2Dinv* adalah program komputer yang dapat menentukan model resistivity2 dimensi (2D) dari bawah permukaan dari data lapangan hasil survei pencitraan elektrikal. Model 2D menggunakan program inversi dengan teknik optimasi *least-square* non linier dan *subrotine* dari permodelan maju digunakan untuk menghitung nilai resistivitas semu. Program ini didesain untuk invert data yang besar (sekitar 200-21000 *datapoint*) dengan banyak elektroda (25-16000 buah elektroda) (Griffiths and Barker, 1993). Gambar 2.11 adalah contoh penampang 2D hasil inversi aplikasi *Res2Dinv*.



Gambar 2.11 Hasil penampang 2D menggunakan aplikasi *Res2Dinv* dengan nilai elevasi (Lutfinur, 2012)

### 2.12.2 *Voxler*

*Voxler* merupakan program visualisasi ilmiah secara tiga dimensi (3D) yang berorientasi *Volumetric Rendering* dan menampilkan data secara 3D. Selain penekanannya pada volume (3D), *Voxler* juga dapat memanfaatkan kegunaan grid dua dimensi (2D) seperti file *Digital Elevation Models* (DEM), *image* (gambar), dan data titik yang tersebar (*scatter point data*). *Voxler* dapat juga menampilkan *streamlines*, *vector plots*, *contour maps*, *isosurfaces*, *image slices*, *three-dimensional scatter plots*, *direct volume rendering* dan sebagainya. Modul komputasi termasuk *three-dimensional gridding*, *resampling*, *numerous lattice operations*, dan *image processing*. *Voxler* dirancang untuk menampilkan data XYZC, di mana C adalah variabel pada setiap X, Y, dan Z lokasi. Misal jika diterapkan dalam bidang geofisika dalam membuat data model geolistrik, X, Y dan Z adalah koordinat (bujur, lintang dan elevasi/kedalaman) dan C adalah *resistivity* (*Rho*) (Nurfalaq, 2016). Gambar 2.12 merupakan contoh hasil pengolahan 3D menggunakan *Voxler*.

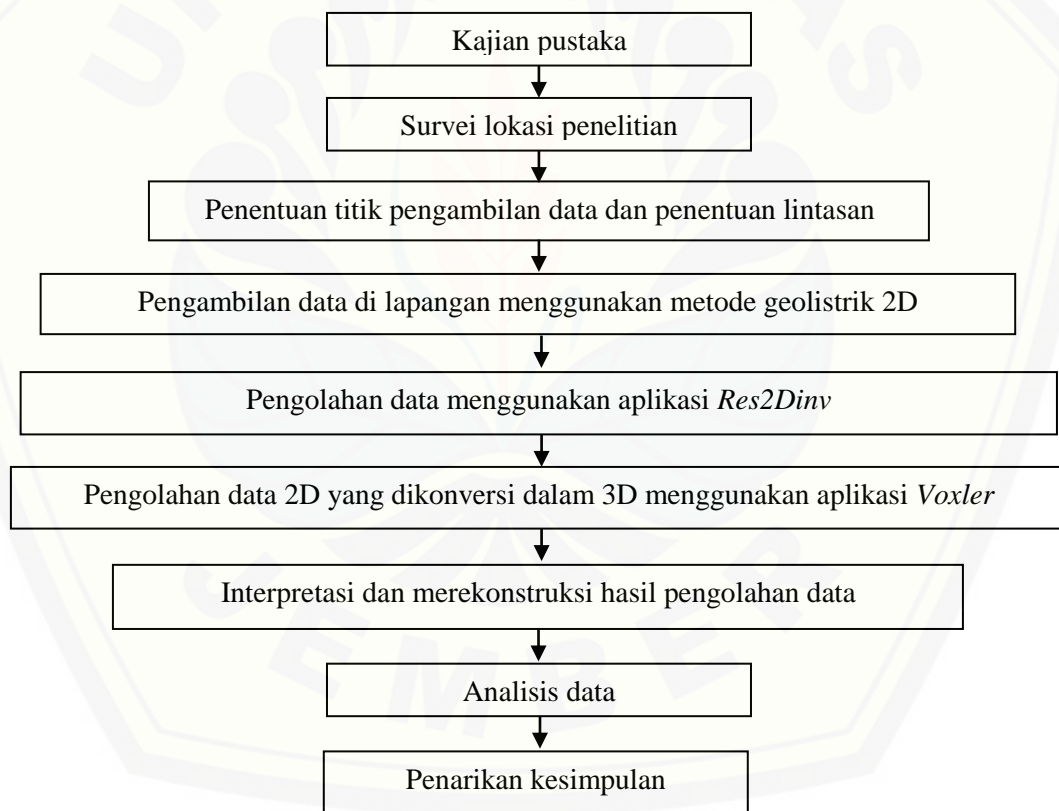


Gambar 2.12 Hasil penampang 3D menggunakan aplikasi *Voxler* (Irawati, 2019)

### BAB 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dirancang dengan tujuan mencitrakan kondisi bawah permukaan menggunakan metode geolistrik resistivitas dan menganalisa volume akuifer berdasarkan bentuk dan ukuran akuifer. Metode tersebut digunakan untuk mengidentifikasi potensi akuifer yang berisi air tanah dengan resistivitas (0 – 300)  $\Omega\text{m}$  (Telford *et al.*, 1990). Sementara itu, untuk nilai resistivitas air tanah yang akan dijadikan rujukan tambahan oleh penulis adalah nilai resistivitas yang nantinya diperoleh dari hasil penelitian di sekitar sumber mata air Manggar. Rancangan penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3.1 Diagram alir rancangan penelitian



Penjelasan secara umum mengenai rancangan tahapan penelitian pada Gambar 3.1 sebagai berikut:

### 3.1.1 Kajian Pustaka

Kajian pustaka merupakan langkah awal dalam penelitian ini. Kajian pustaka dilakukan dengan mencari referensi pembahasan dalam buku, artikel, jurnal atau skripsi yang berkaitan dengan tema penelitian yakni mengidentifikasi potensi akuifer di kawasan Situs Klanceng yang berada di Dusun Klanceng, Desa Kamal, Kecamatan Arjasa. Referensi yang telah sesuai dengan tema penelitian ini dikaji sehingga dapat menentukan metode. Metode yang telah ditentukan, digunakan untuk mendapatkan data, mengakuisisi data hingga menarik kesimpulan berdasarkan referensi yang telah ada.

### 3.1.2 Survei Lokasi Penelitian

Survei lokasi penelitian dilakukan untuk mengetahui kondisi lingkungan di Dusun Klanceng, Desa Kamal, Kecamatan Arjasa, Kabupaten Jember dan sekitarnya, sehingga bisa ditentukan lokasi pengambilan data. Ada empat lintasan di dua lokasi yang akan diambil datanya. Lokasi pertama di kawasan Situs Klanceng yang berada di Dusun Klanceng Desa Kamal (2 lintasan) : lintasan pertama dan kedua terletak di selatan Situs Klanceng ( $08^{\circ}06.269'LS - 113^{\circ}45.141'BT$ ) – ( $08^{\circ}06.370'LS - 113^{\circ}45.128'BT$ ) . Lokasi kedua di belakang Rumah Sekretaris Desa Kamal (2 lintasan) : lintasan ketiga dan keempat terletak diantara sumber mata air Manggar dan sumur warga ( $08^{\circ}06'05.4''LS - 113^{\circ}45'09.2''BT$ ) – ( $08^{\circ}06'05.2''LS - 113^{\circ}45'08.8''BT$ ). Lebih jelasnya lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Peta lokasi penelitian di kawasan Situs Klanceng (Google maps, 2019)

### 3.1.3 Persiapan Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan untuk menunjang proses pengambilan ataupun proses akuisisi data penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. *GPS (Global Positioning System)*

GPS digunakan untuk menentukan titik koordinat ataupun titik lokasi penelitian dan elevasi permukaan tanah.

b. *Resistivity Meter*

*Resistivity meter* digunakan untuk mengukur nilai beda potensial ( $V$ ) dan kuat arus ( $I$ ).

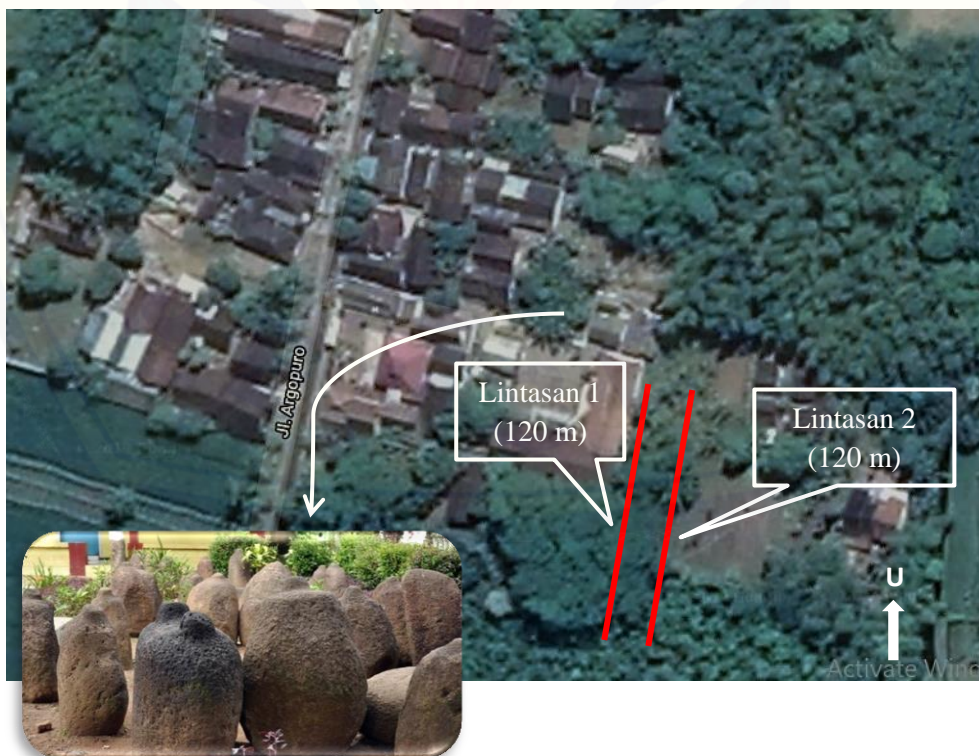
c. Kabel dan konektor

Kabel dan penjepit digunakan untuk menghubungkan antara elektroda dengan multimeter

- d. Meteran  
Meteran digunakan untuk mengukur panjang lintasan.
- e. Palu  
Palu digunakan untuk membantu menanam elektroda
- f. Alat tulis  
Alat tulis digunakan untuk mencatat hasil yang didapat dari penelitian.
- g. Kamera  
Kamera digunakan untuk pengambilan gambar pada saat penelitian.

#### 3.1.4 Penentuan Titik Pengambilan Data dan Lintasan

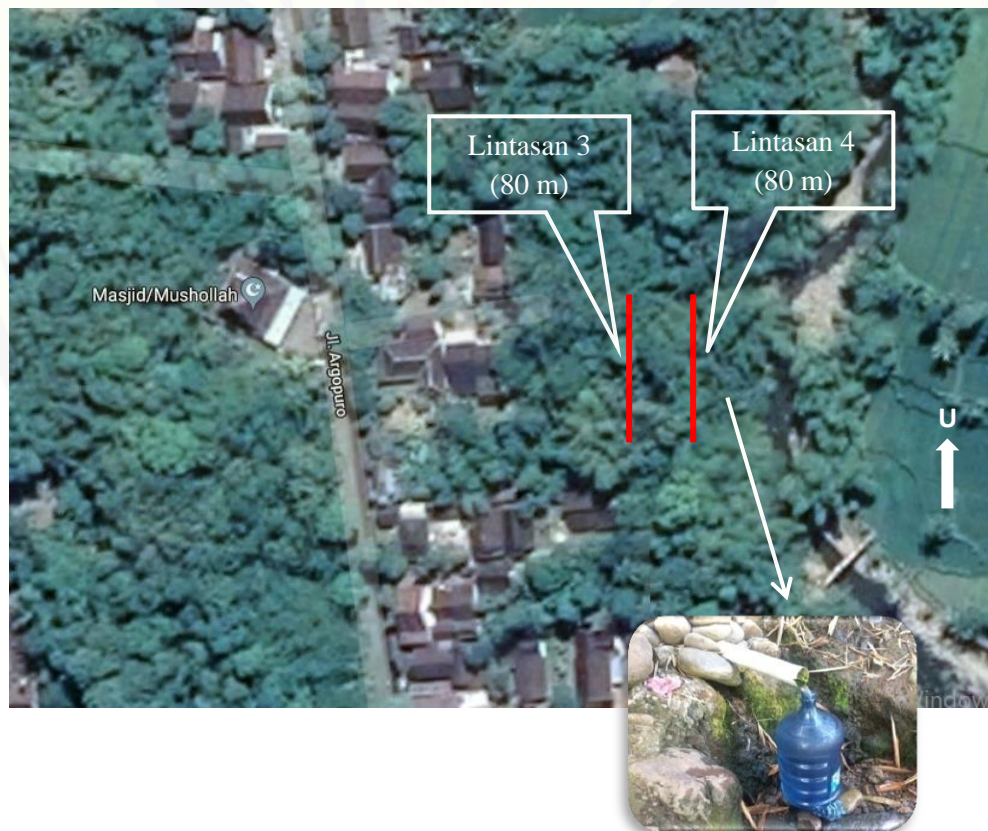
Penentuan lintasan yang diambil datanya didasarkan atas terdapatnya sumber mata air dan sumur yang tidak kering saat musim kemarau di sekitar lokasi yang diduga kuat terdapat akuifer di bawah permukaan tanahnya. Selain itu juga disesuaikan dengan area yang memungkinkan untuk dilakukan pengambilan data. Lintasan pengambilan data dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan 3.4.



Gambar 3.3 Lintasan pengambilan data di lokasi pertama(Google maps, 2019)



Gambar 3.3 merupakan desain lintasan di lokasi pertama yang berada di sebelah selatan Situs Klanceng dengan jarak sekitar 10 m dari situs. Jarak antara lintasan 1 dan lintasan 2 sebesar 5 m. Panjang masing-masing lintasan pengambilan data 120 m dengan spasi elektroda untuk kedua lintasan tersebut sebesar 6 m dengan nilai  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6,$  dan  $7$ . Pergerakan elektroda untuk  $n=1$  berdasarkan konfigurasi *Wenner-Schlumberger* sebagai berikut : elektroda potensial ( $P_1$  dan  $P_2$ ) ditanam diantara elektroda arus ( $C_1$  dan  $C_2$ ). Elektroda arus ( $C_1$ ) berada pada titik 0 m, elektroda potensial ( $P_1$ ) pada 6 m, elektroda potensial ( $P_2$ ) pada 12 m dan elektroda arus ( $C_2$ ) pada 18 m. Pergerakan elektroda selanjutnya ialah setiap elektroda digeser sejauh 6 m dari titik sebelumnya. Pergerakan elektroda dilakukan berulang hingga elektroda arus ( $C_2$ ) mencapai titik 120 m. Pergerakan elektroda untuk “ $n$ ” berikutnya ialah jarak antara elektroda arus ( $C_1$ ) dengan elektroda potensial ( $P_1$ ) dan elektroda arus ( $C_2$ ) dengan elektroda potensial ( $P_2$ ) masing-masing divariasi penambahan panjang sejauh 6 m terhadap titik sebelumnya.



Gambar 3.4 Lintasan pengambilan data di lokasi kedua (Google maps, 2019)

Gambar 3.4 merupakan desain lintasan di lokasi kedua yang berada di antara sumur warga dan sumber mata air Manggar. Jarak antara lintasan 3 dan lintasan 4 sebesar 10 m. Panjang masing-masing lintasan pengambilan data 80 m dengan spasi elektroda untuk kedua lintasan tersebut sebesar 5 m dengan nilai  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6,$  dan  $7$ . Pergerakan elektroda untuk  $n=1$  berdasarkan konfigurasi *Wenner-Schlumberger* sebagai berikut : elektroda potensial ( $P_1$  dan  $P_2$ ) ditanam diantara elektroda arus ( $C_1$  dan  $C_2$ ). Elektroda arus ( $C_1$ ) berada pada titik 0 m, elektroda potensial ( $P_1$ ) pada 5 m, elektroda potensial ( $P_2$ ) pada 10 m dan elektroda arus ( $C_2$ ) pada 15 m. Pergerakan elektroda selanjutnya ialah setiap elektroda digeser sejauh 5 m dari titik sebelumnya. Pergerakan elektroda dilakukan berulang hingga elektroda arus ( $C_2$ ) mencapai titik 80 m. Pergerakan elektroda untuk “n” berikutnya ialah jarak antara elektroda arus ( $C_1$ ) dengan elektroda potensial ( $P_1$ ) dan jarak antara elektroda arus ( $C_2$ ) dengan elektroda potensial ( $P_2$ ) masing-masing divariasikan penambahan panjang sejauh 5 m terhadap titik sebelumnya.

### 3.1.5 Pengambilan Data Menggunakan Metode Geolistrik 2D

Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan metode geolistrik. Metode tersebut merupakan metode yang memiliki prinsip kerja menginjeksikan arus ke permukaan tanah dengan menggunakan empat elektroda. Empat elektroda tersebut yaitu dua elektroda arus ( $C_1, C_2$ ) dan dua elektroda yang digunakan untuk menghitung tegangan ( $P_1, P_2$ ). Posisi peletakan keempat elektroda disesuaikan dengan konfigurasi yang digunakan yaitu konfigurasi *Wenner-Schlumberger* seperti Gambar 2.9 di atas. Keempat elektroda tersebut diletakkan dalam satu garis lurus sepanjang lintasan dengan spasi elektroda sebesar 5 m (lokasi 1) dan 6 m (lokasi 2) dengan  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6,$  dan  $7$  untuk setiap lintasan di kedua lokasi tersebut. Spasi elektroda tersebut digunakan untuk pengambilan data penelitian dengan target kedalaman 16 m (lokasi 1) dan 19 m (lokasi 2). Data didapatkan dengan cara menginjeksikan arus kemudian mengukur tegangan yang muncul. Berdasarkan data arus dan tegangan yang didapatkan, dengan memperhitungkan



faktor geometri, resistivitas semu dapat dihitung. Keempat data tersebut diolah menggunakan aplikasi *Res2Dinv* untuk memperoleh penampang 2D.

#### 3.1.6 Pengolahan Data Menggunakan Aplikasi *Res2Dinv* dengan Memasukkan Data Elevasi

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan bantuan dari *software Res2Dinv* sehingga didapatkan penampang 2D. Hasil penampang menunjukkan kondisi bawah permukaan tanah sesuai dengan resistivitas yang telah dihitung. Lokasi penelitian berupa daerah yang cukup datar sehingga tidak diperlukan data elevasi setiap titik datum.

#### 3.1.7 Pengolahan Data 2D yang Dikonversi dalam 3D Menggunakan Aplikasi *Voxler*

Data 2D yang telah diolah menggunakan aplikasi *Res2Dinv* dikonversi ke dalam bentuk 3D menggunakan aplikasi *Voxler*. Aplikasi tersebut digunakan untuk menggambarkan keberadaan dan bentuk akuifer yang berada di bawah permukaan tanah dengan mengunci nilai resistivitas dari air tanah di kawasan Situs Klanceng. Hasil rekonstruksi 3D yang telah diolah, kemudian dianalisis perkiraan volume dari akuifer tersebut.

#### 3.1.8 Interpretasi dan Analisis Data

Hasil penelitian yang berupa data arus dan tegangan dikalikan dengan faktor geometri untuk mendapatkan nilai resistivitas semu, kemudian diinversi menggunakan aplikasi *Res2Dinv* sehingga didapatkan penampang 2D untuk citra resistivitas yang sebenarnya. Citra resistivitas yang didapatkan, kemudian dianalisis dengan melihat anomali resistivitas yang terjadi di bawah permukaan tanah. Anomali resistivitas tersebut dibandingkan dengan nilai resistivitas sesuai referensi. Studi kasus anomali resistivitas dalam penelitian ini yaitu resistivitas air tanah. Nilai resistivitas air tanah yang telah didapatkan dari pengolahan data secara 2D, kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan aplikasi *Voxler* untuk mendapatkan penampang 3D. Hasil data yang telah diolah menggunakan aplikasi

*Voxler* berupa data 3D, menunjukkan gambar bentuk akuifer yang berada di dalam tanah. Bentuk akuifer yang didapatkan, kemudian dikaitkan dengan keberadaan sumber mata air dan sumur di lokasi penelitian. Hasil analisis tersebut diamati berdasarkan bentuk serta ukurannya, guna mendapatkan visualisasi volume akuifer di lokasi penelitian.

### 3.1.9 Penarikan Kesimpulan

Tahapan terakhir dalam proses penelitian yaitu penarikan kesimpulan. Penarikan kesimpulan menjadi tahapan terakhir yang menjelaskan secara singkat pembahasan dari hasil yang didapatkan. Penarikan kesimpulan menjawab permasalahan yang menjadi dasar penelitian ini.

## 3.2 Jenis dan Sumber Data

Jenis dan sumber data yang didapatkan berupa data kuantitatif. Data lapangan didapatkan dengan cara melakukan pengukuran langsung di area sumber mata air Manggar dan Situs Klanceng. Data hasil di lapangan diperoleh menggunakan metode geolistrik resistivitas. Data yang didapatkan dari metode tersebut yaitu beda potensial ( $V$ ), arus ( $I$ ), resistivitas semu ( $\rho_a$ ), data topografi berupa titik longitude ( $x$ ), altitude ( $y$ ) dan elevasi ( $z$ ).

## 3.3 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang diamati dan diukur dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut:

- a. Spasi atau jarak antar elektroda pada setiap lintasan yaitu sebesar 6 m (lokasi 1) dan 5 m (lokasi 2).
- b. Konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi *Wenner-Schlumberger*.
- c. Koordinat titik data oleh pengukuran GPS.
- d. Beda potensial ( $V$ ) yang terukur pada *resistivitymeter*.
- e. Arus ( $I$ ) yang terukur pada *resistivitymeter*.
- f. Resistivitas ( $\Omega m$ ).
- g. Titik koordinat.

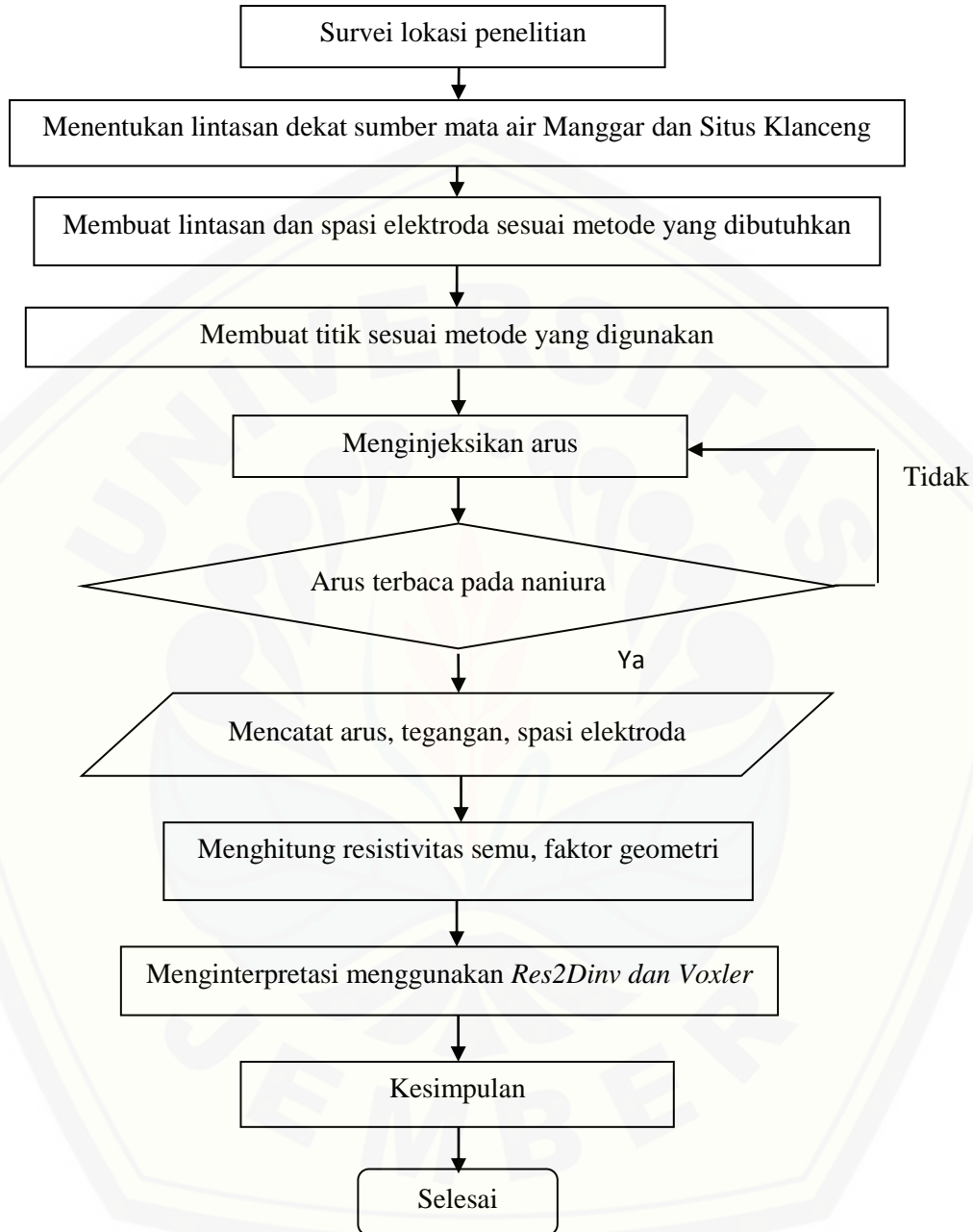
- h. Elevasi.
- i. Visualisasi 3D

### 3.4 Metode dan Analisa Data

Analisis data dilakukan dengan mengolah data hasil pengukuran berupa kuat arus dan tegangan dengan program *Excel* untuk menentukan faktor geometri dan nilai resistivitas semu. Data input *Res2Dinv* diletakkan pada *text editor* dan disimpan dalam bentuk *(.dat)*. Langkah selanjutnya yaitu membuka data yang telah tersimpan tersebut pada *Res2Dinv* di menu *file*. Kemudian, pilih *Choose logarithm of apparent resistivity* dan pilih *least square inversion* pada menu *inversion*, dimana pada langkah ini bertujuan untuk menampilkan hasil penampang 2D. Kemudian, data hasil inversi pada *Res2Dinv* yang berupa koordinat, kedalaman, nilai konduktivitas dan nilai resistivitas yang telah tersimpan dalam bentuk *(.dat)* diolah menggunakan aplikasi *Voxler* untuk menganalisis bentuk dan ukuran akuifer. Cara mengolah data pada aplikasi *Voxler* dilakukan dalam beberapa tahap. Tahap pertama yaitu memuat data (*load data*). Langkah berikutnya yaitu *transform*, dimana pada langkah ini berguna untuk memilih bentuk-bentuk yang ingin ditampilkan secara 3D. Langkah selanjutnya yaitu *scatter plot*, dimana pada langkah ini ditentukan simbol, ukuran, kerapatan, warna dan sebagainya yang pada akhirnya didapatkan gambaran volumenya. Kemudian, pengolahan data dilanjutkan dengan proses pengolahan *isosurface* untuk memvisualisasikan volume akuifer berdasarkan bentuk dan ukuran akuifer yang tampak dari proses rekonstruksi.

### 3.5 Kerangka Pemecahan Masalah

Kerangka pemecahan masalah pada penelitian ini adalah:



Gambar 3.5 Diagram alir kerangka pemecahan masalah penelitian

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari pengolahan secara 2D dan 3D dapat disimpulkan bahwa :

1. Nilai resistivitas yang diduga sebagai lapisan air tanah untuk lintasan 1 dan lintasan 2 didapatkan di rentang nilai  $(0,8 - 6,8) \Omega m$ . Potensi akuifer pada lintasan 1 dan lintasan 2 ditemukan dari kedalaman  $(1,5 - 7,6) m$ , walaupun kondisi tanah saat penelitian dalam keadaan kering. Begitupula dengan kondisi sumur-sumur di sekitar lintasan 1 dan lintasan 2 dalam keadaan kering.
2. Nilai resistivitas yang diduga sebagai lapisan air tanah untuk lintasan 3 dan lintasan 4 didapatkan di rentang nilai  $(2,5 - 7,9) \Omega m$ . Potensi akuifer pada lintasan 3 ditemukan dari kedalaman  $(6,4 - 15,9) m$ . Sementara itu, potensi akuifer pada lintasan 4 ditemukan dari kedalaman  $(3,8 - 12,4) m$ .
3. Hasil rekonstruksi 3D lokasi 2 didapatkan perkiraan volume akuifer  $\pm 4,4 m^3$ . Ukuran tersebut bukanlah ukuran yang sebenarnya melainkan hanyalah sebuah perkiraan menggunakan perhitungan manual dikarenakan data titik-titik yang diduga sebagai lapisan air tanah yang didapatkan terlalu sedikit.
4. Akuifer yang terdapat di kawasan Situs Klanceng, Kabupaten Jember merupakan jenis akuifer bebas dimana cadangan airnya berasal dari hasil tangkapan air setempat.

### 5.2 Saran

Penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan air tanah maupun akuifer, diharapkan lebih banyak mencari referensi terkait dengan penelitian tersebut. Kedua, yaitu agar penelitian selanjutnya yang dilakukan di tempat tersebut untuk memperpanjang area serta memperbanyak titik datum yang akan diambil datanya agar dapat lebih dalam lagi dan lebih akurat lagi dalam mengidentifikasi



lapisan-lapisan yang ada di permukaan tanah. Terakhir, bagi penelitian selanjutnya untuk lebih memperhatikan pengaruh kondisi tanah yang kering ketika musim kemarau dalam melakukan injeksi supaya hasil yang diperoleh tidak memiliki *error* yang tinggi.



**DAFTAR PUSTAKA**

- Adimah, S.N., Kayan, dan S., Sujitro. 2013. *Situs Duplang di Desa Kamal Kecamatan Arjasa Kabupaten Jember : Historisitas dan Pemanfaatannya Sebagai Sumber Pembelajaran Sejarah*. Jember : Universitas Jember.
- Arsyad, S. 2000. *Konservasi Tanah dan Air*. Bogor : Institut Pertanian Bogor Press.
- Asdak, C. 1995. *Hidrologi dan Pengolahan Air Sungai*. Yogyakarta : Gajah Mada University Press.
- Asra, A. 2012. Penentuan Sebaran Akuifer Dengan Metode Tahanan Jenis (Resistivity Method) di Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten. *Skripsi*. Bogor Institut Pertanian Bogor.
- Ayuni, F. A., Azwan, M. M. Z., dan Fikri, A. A. 2015 *Development of 3D Model View of Potential Groundwater Aquifer For Irrigation Using Geophysical Technique*. Malaysia : UTM Press.
- Badan Meterologi Klimatologi dan Geofisika. 2019. *Prakiraan Musim Kemarau 2019*. Jakarta : Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Badan Perencanaan dan Pembangunan Daerah. 2013. *Profil Jember*. Jember.
- Badan Pusat Statistik. 2010. *Jumlah Penduduk Kabupaten Jember Hasil Sensus Penduduk Tahun 2010 Menurut Desa*. Jember.
- Buwana, B. 2019. Identifikasi Sebaran Akuifer dengan Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas 1D Konfigurasi Schlumberger di Lingkungan FMIPA Universitas Jember. *Skripsi*. Jember : Universitas Jember.
- Chaniago, R. dan Yuhan. 1995. *Laporan Pemetaan Geologi Foto G. Iyang Argopuro, Jawa Timur*. Bandung: DPE, Dit.Jen. Geologi Dan Sumber Daya Mineral Direktorat Vulkanologi.
- Christine, M.S. 2012. Air Tanah. *Skripsi*. Bandung : Universitas Kristen Maranatha.
- Dhani, A.S. 2014. *Analisis Tingkat Rawan Kekeringan Lahan Sawah Dengan Pemanfaatan Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografis di Kabupaten Sragen*. Surakarta : Universitas Muhammadiyah Surakarta
- Farhan, Y. 2017. *Masa Lalu Jember*. Jember: CV Pustaka Abadi.

- Griffiths, D. H. dan Barker, R. D. 1993. *Two-Dimensional Resistivity Imaging and Modeling in Areas of Complex Geology*. Birmingham : Journal of Applied Geophysics.
- Google. Tanpa Tahun. Google Maps. <https://www.google.com/maps/@-8.1011188,113.7508055,18z>. [Diakses Agustus 2019].
- Hartoyo. 2010. *Program Pengembangan Penyediaan Air Untuk Menjamin Ketahanan Pangan Nasional*. Bogor : Kementerian Pekerjaan Umum.
- IPCC, A. (2007). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Climate change 2007: Synthesis report.
- Irawati, A. 2019. Rekonstruksi Artefak Zaman Megalitikum Berdasarkan Citra Bawah Permukaan Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas di Dusun Kendal, Desa Kamal-Arjasa. *Skripsi*. Jember : Universitas Jember.
- Irawati, Rahman., A., dan Dahlan, TH. M. 2016. *Identifikasi Sebaran Aquifer Menggunakan Metode Geolistrik Hambatan Jenis di Desa Bora Kecamatan Sigi Biromari Kabupaten Sigi*. Palu : Universitas Tadulako.
- Irham, M. N., Yustiana, M., dan Widada, S. 2006. *Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Porositas dan Permeabilitas Pada Batu Pasir*. Semarang : Universitas Diponegoro.
- Istiqamah, N. 2018. Studi Potensi Air Tanah Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas di Desa Rajekwesi Kecamatan Kendit Kabupaten Situbondo. *Skripsi*. Malang : Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2008. *Status Lingkungan Hidup Indonesia 2008*. Jakarta : Kementerian Lingkungan Hidup.
- Kodoatie, R. J. dan Sjarief, R. 2010. *Tata Ruang Air*. Yogyakarta : Penerbit ANDI Yogyakarta.
- Loke, M. H. 2000. *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies : A Partical Guide to 2D and 3D Surveys*. England : Birmingham University.
- Lutfinur, I. 2015. *Identifikasi Sesar Bawah Permukaan Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Schlumberger (Studi Kasus Sungai Opak Yogyakarta)*. Semarang : Universitas Negeri Semarang.

- Mohamaden, M. I. I., Hamouda, A. Z., dan Mansour, S. 2016. *Application of electrical resistivity method for groundwater exploration at the Moghra area, Western Desert, Egypt*. Egypt : National Institute of Oceanography and Fisheries.
- Morris, B. L., Lawrence, A.R.L., Chilton, P. J. C., Adams, B., Calow, R. C., dan Klinck, B. A. 2003. *Groundwater and Its Susceptibility to Degradation : A Global Assessment of the Problem and Options for Management*. Nalrobi : United Nations Environment Programme.
- Nurfalaq, A. 2015. *Pemodelan Geofisika Explorasi Menggunakan Voxler*. Palopo : Universitas Cokroaminoto Palopo.
- Pagano, T. dan Sorooshian, S. 2002. *Hydrologic Cycle : Volume 1*. Tucson : University of Arizona.
- Paluyio, J., As'ari, dan Tongkukut, S. H.J. 2018. *Perbandingan Konfigurasi Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipole-Dipole, dan Pol-Dipol dalam Metode Geolistrik Tahanan Jenis untuk Mendeteksi Keberadaan Air Tanah*. Manado : Universitas Manado.
- Pemerintah Desa Kamal.2012. *Buku Administrasi Desa Kamal Jember*. Jember: Pemerintah Desa Kamal.
- Permatasari, I. 2016. Survey Sebaran Pasir Besi Dengan Metode Geolistrik Resistivitas (Tahanan Jenis) Konfigurasi Dipole-Dipole di Pantai Marina Kabupaten Bantaeng Sulawesi Selatan. *Skripsi*. Makassar: UIN Alauddin Makassar.
- Ravindran, A. A. dan Abdul, M. K. H. 2012. *Groundwater exploration study using Wenner-Schlumberger electrode array through W-4 2D Resistivity Imaging systems at Mahapallipuram, Chennai, TAMILANADU, India*. India : Departement of Geology.
- Reynolds, J. M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New York: John Wiley & Sons.
- Sakka, 2002. *Metoda Geolistrik Tahanan Jenis*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam – UNHAS, Makassar.
- Sapei, T., Suganda A.H., Astadireja, K.A.S, dan Suharso. 1992. *Peta Geologi Lembar Jember*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Semekto, C. 2016. *Potensi Sumber Daya Air di Indonesia*. Brisbane. University of Queensland.

Soekamto, H. 1995. *Geosfer dan Lingkungan Kehidupan*. Malang : Departemen Pendidikan dan Kebudayaan IKIP Malang.

Sosrodarsono, S. dan Takeda, K. 2003. *Hidrologi Untuk Pengairan*. Jakarta : PT Pradnya Paramita.

Telford, W.M., R.E., Sherif, dan L.P., Geldart. 1990. *Applied Geophysics Second Edition*. New York: Cambridge University.

Todd, D. K. 1995. *Groundwater Hydrology : Third Edition*. Berkeley. University of California.





**LAMPIRAN**

