



***PROTOTYPE PORTABLE ELECTRICAL RESISTANCE
TOMOGRAPHY***

SKRIPSI

Oleh:

Ahmad Zaenal Hayat

NIM 151810201022

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2019



***PROTOTYPE PORTABLE ELECTRICAL RESISTANCE
TOMOGRAPHY***

SKRIPSI

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

Oleh:

Ahmad Zaenal Hayat

NIM 151810201022

JURUSAN FISIKA

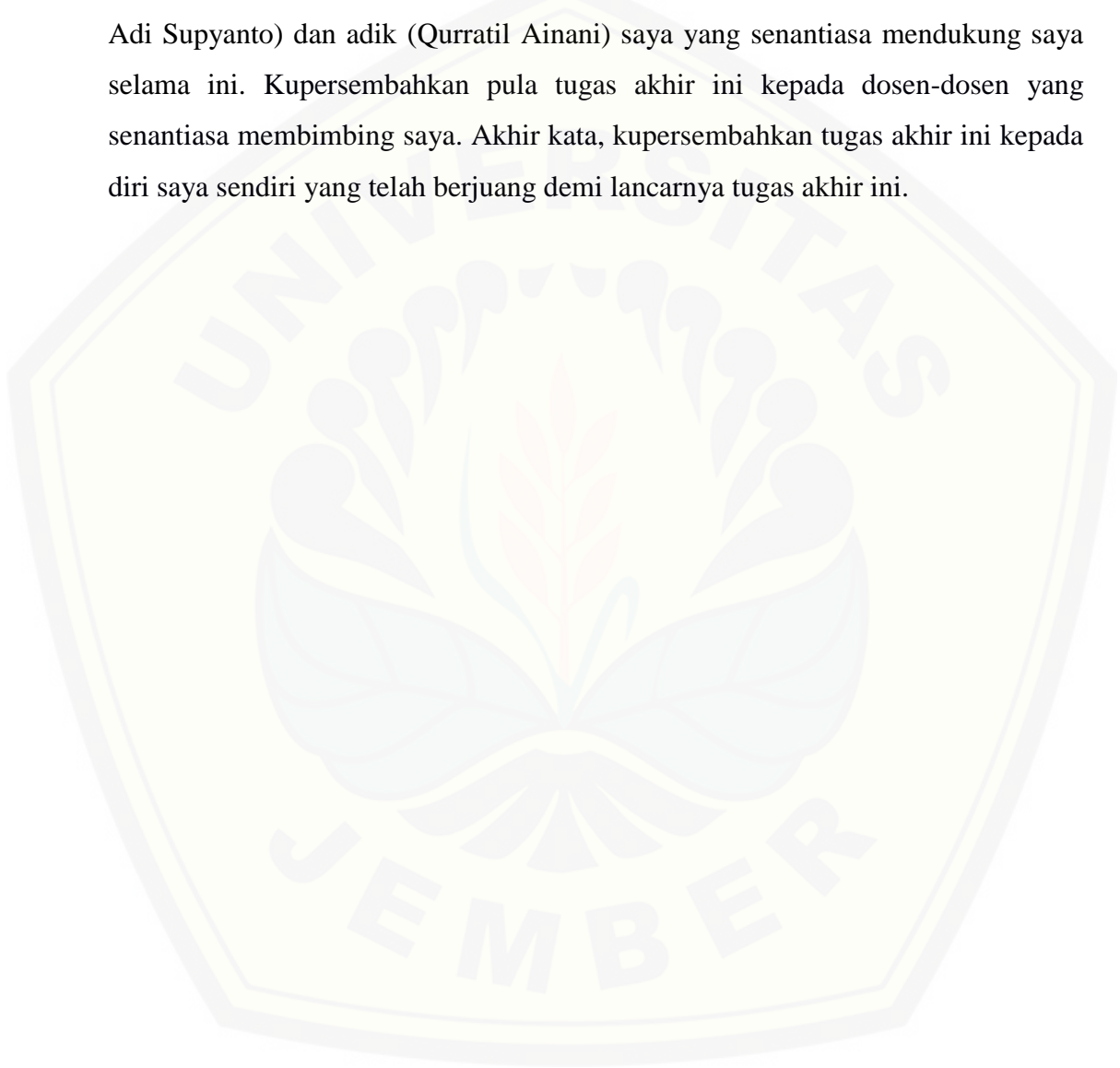
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2019

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah sujud syukurku persembahkan kepada-Nya. Berkat rahmat dan hidayah-Nya saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Kupersembahkan tugas akhir ini untuk Mama (Suliha), Babah (Hariri), Mbak (Kusmawati), Mas (Hendra Adi Supyanto) dan adik (Qurratil Ainani) saya yang senantiasa mendukung saya selama ini. Kupersembahkan pula tugas akhir ini kepada dosen-dosen yang senantiasa membimbing saya. Akhir kata, kupersembahkan tugas akhir ini kepada diri saya sendiri yang telah berjuang demi lancarnya tugas akhir ini.



MOTTO

Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sebelum mereka
mengubah keadaan diri mereka sendiri
(terjemahan Surat Al-Ra'd ayat 11)*)

Lakonah lakoneh. Kennengah kennengeh. Ollenah sakkoreh
(Filosofi Madura)



*⁾ Departemen Agama RI. 2005. *Al-Aliyy: Al-Qur'an dan Terjemahannya*.
Bandung : CV Penerbit Diponegoro.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Zaenal Hayat

NIM : 151810201022

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “*Prototype Portable Electrical Resistance Tomography*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, 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 serta 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, Juli 2019
Yang menyatakan,

Ahmad Zaenal Hayat
NIM. 151810201022

SKRIPSI

**PROTOTYPE PORTABLE ELECTRICAL RESISTANCE
TOMOGRAPHY**

Oleh

Ahmad Zaenal Hayat

NIM 151810201022

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D.

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

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “*Prototype Portable Electrical Resistance Tomography*” telah diuji dan disahkan pada :

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember

Time Penguji:

Ketua,

Anggota 1,

Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D.
NIP. 196812191994021001

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

Anggota II,

Anggota III,

Supriyadi S.Si, M.Si.
NIP. 198204242006041003

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si.
NIP. 198111112005012001

Mengesahkan

Dekan FMIPA Universitas Jember

Drs. Sujito, Ph. D.

NIP. 196102041987111001

RINGKASAN

Prototype Portable Electrical Resistance Tomography; Ahmad Zaenal Hayat, 151810201022; 2019; 103 halaman; Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas jember.

Tomografi merupakan cara untuk mencitrakan sesuatu secara *non-destruktif*. Beberapa tipe dari tomografi diantaranya *Electrical Resistance Tomography* (ERT), *Electrical Impedance Tomography* (EIT), dan *Electrical Capacitance Tomography* (ECT). ECT memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan portabel. Harga yang dipakai untuk pembuatan ECT cukup tinggi, karena setiap lapisan tabung harus dilapisi dengan lempengan tembaga. *Electrical Resistance Tomography* (ERT) merupakan metode perhitungan distribusi resistivitas di bawah permukaan menggunakan pengukuran tegangan dan arus.

Penelitian ini bertujuan untuk menggabungkan sistem ECT dan ERT. Penggabungan ini dilakukan dengan memanfaatkan teknik ERT yang ada pada metode *Borehole* dan mengembangkannya sehingga dapat digunakan pada objek yang lebih kecil seperti pada ECT. Penelitian ini dilakukan dalam 3 tahapan besar, yaitu: pembuatan desain, realisasi desain dan pengujian. Seluruh desain direalisasikan dengan merancang secara eksperimen. Setelah realisasi desain selanjutnya adalah pengujian. Pengujian dilakukan dalam 2 tahapan, yaitu: secara homogen dan heterogen. Simulasi juga dilakukan karena belum ada penelitian sebelumnya tentang topik yang sama. Metode simulasi yang digunakan adalah metode beda hingga. Hasil dari metode beda hingga adalah nilai distribusi tegangan menggunakan persamaan pendekatan beda hingga. Hasil dari simulasi selanjutnya dianalisis dengan *fitting*, *filter* dan FFT. Hal ini dilakukan untuk memudahkan dalam menganalisa hasil. Hasil simulasi yang didapat selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengujian.

Kesimpulan dari hasil yang didapat pada saat hasil eksperimen dibandingkan dengan hasil simulasi yaitu keduanya memiliki kesamaan pola. Pola beda tegangan terukur yang didapat pada saat simulasi memiliki amplitudo yang paling besar jika dibandingkan dengan hasil eksperimen. Sedangkan perbandingan antara hasil eksperimen pada saat menggunakan medium air dan pasir didapatkan bahwa amplitudo pola beda tegangan yang terjadi pada saat menggunakan medium air nilainya lebih besar daripada saat menggunakan medium pasir. Hal ini karena semakin tinggi nilai resistivitas dari medium maka beda tegangan terukurnya akan semakin kecil. Penambahan material pengganggu dan variasi posisi material tersebut mempengaruhi nilai beda tegangan terukurnya. Variasi posisi material pengganggu dilakukan sebanyak 3 posisi yang berbeda. Ketiga posisi tersebut adalah material berada di tengah, material berada dekat dengan *Ground* dan material berada dekat *Input*. Ketiga posisi tersebut memiliki pola beda tegangan yang hampir sama. Perbedaan yang terjadi pada ketiga posisi tersebut adalah nilai amplitudo dari pola beda tegangannya. Amplitudo pola beda tegangan tertinggi terjadi pada saat medium berada dekat dengan *Ground*. Amplitudo pola beda tegangan terendah terjadi pada saat medium berada dekat dengan *Input*. Hal ini membuktikan bahwa

semakin dekat material dengan *Input* maka beda tegangan terukurnya akan semakin kecil. Pada kedua medium, pengaruh dari variasi posisi material ini sama. Hal ini membuktikan bahwa kedua medium yang memiliki nilai resistivitas yang berbeda, namun memiliki pola beda tegangan yang sama.



PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “*Prototype Portable Electrical Resistance Tomography*”. 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 dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Nurul Priyantari, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu dan pikiran dalam membantu penulisan skripsi ini;
2. Supriyadi, S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji Utama dan Endhah Purwandari, S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan kritik dan saran dalam penulisan skripsi ini;
3. Dr. Sutisna, S.Pd., M.Si. selaku Dosen pembimbing Akademik yang telah membimbing saya dalam melaksanakan perkuliahan;
4. Saudara seperjuangan saya GANESHA PHI, KMTW dan UKM SPORA yang telah berjuang bersama saya;
5. Keluarga besar DHAMPOL dan keluarga besar PANDHI;
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan dimanfaatkan sebagaimana mestinya.

Jember, Juli 2019

Penulis

Ahmad Zaenal Hayat

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
HALAMAN RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tomografi	6
2.2 <i>Electrical Capacitance Tomography (ECT)</i>.....	7
2.3 Metode <i>Crosshole</i>	9
2.4 Medan Listrik	9
2.5 Hukum ‘Ohm	10
2.6 Isolator	11
2.7 Arduino.....	11
2.8 Arduino MEGA	12
2.9 Metode Beda Hingga	12
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	14
3.1 Rancangan Penelitian.....	14

3.2 Kerangka Pemecahan Masalah	15
3.2.1 Pembuatan Desain.....	16
3.2.2 Realisasi	24
3.2.3 Pengujian.....	24
3.3 Metode Analisis Data	27
3.3.1 Penentuan Beda Tegangan	27
3.3.2 Presisi	27
3.3.3 Kesimpulan yang Diharapkan	27
3.3.4 Metode Beda Hingga (<i>Finite Different Methode</i>)	28
3.3.5 <i>Fitting, Filter</i> dan FFT (<i>Fast Fourier Transform</i>).....	29
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Rancang Bangun	31
4.1.1 Desain Arsitektur	31
4.1.2 Desain Elektronika dan Instrumentasi	32
4.2 Simulasi dengan Metode Beda Hingga	33
4.2.1 Metode Beda Hingga (<i>Finite Different Methode</i>)	33
4.2.2 Hasil yang Didapat dari Metode Beda Hingga	35
4.2.3 FFT (<i>Fast Fourier Transform</i>)	38
4.3 Pengujian Sistem ERT secara Homogen dengan Menggunakan Medium Air dan Pasir	40
4.4 Pengujian Sistem ERT secara Heterogen dengan Menggunakan Medium Air dan Pasir	43
4.4.1 Medium Air	45
4.4.2 Medium Pasir	46
4.4.3 Perbandingan Medium Air dan Pasir	48
BAB 5 PENUTUP	51
5.1 KESIMPULAN	51
5.2 SARAN	51
DAFTAR PUSTAKA	58

DAFTAR GAMBAR

2.1	Prinsip tomografi.....	6
2.2	Prinsip dari CT-scanner	7
2.3	Alat medis CT-scanner	7
2.4	Rancang bangun <i>Electrical Capacitance Tomography</i>	8
2.5	Metode <i>Crosshole</i>	9
2.6	Garis-garis medan listrik disaat memiliki muatan yang berbeda kutub	10
2.7	Arduino UNO.....	11
2.8	Arduino MEGA.....	12
2.9	<i>Grid</i> untuk pemodelan numerik	13
3.1	Rancangan penelitian	14
3.2	Implementasi penelitian	16
3.3	Kerangka pembuatan desain	16
3.4	Desain arsitektur.....	16
3.5	Model bentuk elektroda	17
3.6	Penampakan elektroda	17
3.7	Desain tabung penelitian	18
3.8	Penampakan tabung penelitian.....	18
3.9	Peletakan elektroda pada tabung tampak samping.....	18
3.10	Peletakkan elektroda pada tabung tampak atas	19
3.11	Desain elektronika dan instrumentasi	19
3.12	Bentuk pulsa kotak.....	20
3.13	Rangkaian osilator.....	20
3.14	Kerangka pembuatan desain	21
3.15	Rangkaian pengukur tegangan menggunakan arduino mega.....	21
3.16	Desain akuisisi data saat elektroda output dipindah-pindah	22
3.17	Desain pengukuran pada <i>base 1</i>	23
3.18	Desain pengukuran pada <i>base 2</i>	23
3.19	Rangkaian pengujian alat ukur dengan pembagi tegangan	25
3.20	Pengujian secara homogen.....	25

3.21	Pengujian secara heterogen	26
3.22	Perubahan posisi material	26
3.23	Pola garis-garis medan listrik disaat memiliki muatan yang berbeda kutub.....	28
4.1	Rancang bangun sistem ERT (a) tampak atas (b) tampak samping	31
4.2	Realisasi rangkaian osilator	32
4.3	Titik 12 elektroda daam bentuk <i>grid</i>	34
4.4	Distribusi tegangan menggunakan metode beda hingga	35
4.5	Pola beda tegangan pada 12 titik elektroda menggunakan metode hingga..	36
4.6	Beda tegangan yang terjadi pada 13 <i>Base</i> menggunakan metode beda hingga	37
4.7	Beda tegangan yang terjadi pada 13 <i>Base</i> menggunakan metode beda hingga disaat <i>Rover 7</i> dan <i>Base 7</i> dieliminasi	38
4.8	Hasil <i>Fitting</i> menggunakan <i>Fourier Series</i>	39
4.9	Hasil FFT setelah data di <i>Filter</i>	40
4.10	Hasil <i>Fitting</i> data (a) medium air dan (b) medium pasir	41
4.11	Hasil transformasi dari <i>Fitting</i> data pada (a) medium air dan (b) medium pasir.....	42
4.12	Perbandingan hasil FFT simulasi dengan medium air dan medium pasir ...	43
4.13	Posisi material didalam medium (a) material ditengah, (b) material dekat dengan <i>Ground</i> dan (c) material dekat dengan <i>Input</i>	44
4.14	Hasil <i>Fitting</i> sistem ERT menggunakan medium air pada saat (a) material ditengah, (b) material dekat dengan <i>Ground</i> dan (c) material dekat dengan <i>Input</i>	45
4.15	Hasil transformasi <i>Fitting</i> sistem ERT menggunakan medium air.....	46
4.16	Hasil <i>Fitting</i> sistem ERT menggunakan medium pasir pada saat (a) material ditengah, (b) material dekat dengan <i>Ground</i> dan (c) material dekat dengan <i>Input</i>	47
4.17	Hasil transformasi <i>Fitting</i> sistem ERT menggunakan medium pasir	48
4.18	Perbandingan hasil <i>Fitting</i> sistem ERT menggunakan medium air dan pasir pada saat (a) material ditengah, (b) material dekat dengan <i>Ground</i> dan (c) material dekat dengan <i>Input</i>	49

DAFTAR LAMPIRAN

A.	Dokumentasi penelitian.....	56
B.	Tabel hasil pengukuran rangkaian alat ukur berbasis Arduino.....	57
C.	<i>Code</i> metode beda hingga menggunakan aplikasi MatLab.....	57
D.	Matriks 19x19 hasil dari simulasi menggunakan metode beda hingga.....	59
E.	beda tegangan terukur pada keseluruhan <i>Base</i> pada saat simulasi	60
F.	Tabel hasil pengukuran menggunakan medium air pada saat <i>Base</i> 1.....	61
G.	Tabel hasil pengukuran menggunakan medium pasir pada saat <i>Base</i> 1	62
H.	Pola beda tegangan yang didapat pada simulasi, medium air dan medium pasir secara homogen	64
I.	Pola beda tegangan yang didapat pada medium air secara heterogen	64
J.	Pola beda tegangan yang didapat pada medium pasir secara heterogen	65
K.	Hasil FFT perbandingan medium air dan medium pasir secara heterogen..	65
L.	Tabel Resistivitas Bahan	67
M.	<i>Contur Fill</i> Distribusi Tegangan Simulasi dengan Metode Beda Hingga	68

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut etimologi tomografi terdiri dari “Tomo” dan “grafi”. Tomo berarti irisan atau potongan bagian. Grafi berarti mencitrakan atau melukiskan (Ishak *et al*, 2016). Menurut pengertian di atas tomografi merupakan cara mencitrakan sesuatu dalam bentuk bagian-bagian. Implementasi untuk komputasi X-ray tomografi (*X-ray Computed tomography*) pertama kali digagas oleh Godfrey Newbold Hounsfield pada tahun 1972. Beliau juga membangun *prototype* pertama untuk CT-*scanner* dan dikenal sebagai bapak dari komputasi tomografi.

Tomografi pertama kali digunakan dalam bidang kesehatan pada tahun 1895 oleh Wilhelm Conrad Röntgen dikenal dengan nama X-ray. Aplikasi pertama untuk tomografi di bidang industri terjadi pada 1980-an. Tomografi pertama ini menggunakan sistem dari X-ray. Tomografi pertama untuk bidang industri adalah untuk mengetahui keadaan yang terdapat di dalam bahan tanpa harus menghancurkan bahan tersebut (Cantatore & Müller, 2011). Tomografi perlu dikembangkan lagi agar dapat menciptakan alat yang dapat digunakan dalam kehidupan sehari-hari dan meminimalisir dampak negatif untuk pengguna. Contohnya bidang kesehatan yaitu menggunakan tomografi yang lebih aman sebagai pengganti X-ray sehingga dapat mengurangi efek samping dari X-ray. Menurut Subburaj (2011) X-ray memiliki bahaya bagi tubuh manusia. Hal itu dikarenakan X-ray dilakukan dengan cara memaparkan sinar gamma pada tubuh, sehingga menyebabkan radiasi dari sinar tersebut merusak sel sel tubuh. Karena hal inilah penelitian tentang tomografi harus dikembangkan, sehingga dapat digunakan pada bidang kesehatan dan mengurangi kerugian yang dialami oleh manusia. Tomografi dapat digunakan dalam bidang kesehatan, arkeologi, biologi, geofisika, fisika bahan juga bidang industri.

Tomografi dapat diaplikasikan pada beberapa bidang diantaranya adalah bidang kesehatan, bidang keilmuan dan bidang industri. Aplikasi tomografi dalam bidang kesehatan contohnya adalah CT-*scan* (*Computed Tomography Scanner*). CT-*scan* merupakan alat yang digunakan untuk mendiagnosa dengan teknik

radiografi yang menghasilkan citra tubuh dengan memanfaatkan X-ray yang dipancarkan pada tubuh (Subburaj, 2011). Aplikasi tomografi di bidang arkeologi dan bidang geofisika memiliki sistem yang sama. Salah satu metode yang digunakan adalah metode geolistrik. Metode geolistrik adalah salah satu metode geofisika untuk menyelidiki kondisi bawah permukaan dengan mempelajari sifat aliran listrik DC pada batuan di bawah permukaan bumi dan bagaimana cara mendeteksi di permukaan bumi. Dalam survei metode geolistrik akan diperoleh nilai beda potensial, kuat arus dan nilai resistivitas batuan. (Telford *et al*, 1990). Aplikasi tomografi dalam bidang industri dan fisika bahan digunakan untuk mencitrakan bagian dalam suatu bahan atau alat pencampuran bahan industri atau bahan eksperimen tanpa merusak/membongkarnya, sehingga dapat mengurangi kerugian akibat membuang bahan yang sudah dirusak (Chiffre *et al*, 2014).

Tomografi memiliki banyak tipe. Beberapa tipe dari tomografi diantaranya *Electrical Resistance Tomography* (ERT), *Electrical Impedance Tomography* (EIT), dan *Electrical Capacitance Tomography* (ECT). Beberapa tipe di atas merupakan jenis tomografi dari *Electrical Tomography* (ET) (Ishak *et al*, 2016). Jenis *Electrical Tomography* (ET) merupakan jenis tomografi yang memanfaatkan kapasitansi, resistivitas juga impedansi.

Electrical Impedance Tomography (EIT) merupakan teknik pencitraan dengan memanfaatkan impedansi yang terjadi di dalam suatu bahan, adanya perubahan impedansi ini yang digunakan untuk melakukan pencitraan. Hal ini didasarkan pada konsep bahwa arus bolak-balik yang melewati objek elektrik konduktif dapat mempengaruhi distribusi tegangan di permukaannya. EIT direkonstruksi berdasarkan pengukuran listrik dari elektroda yang terpasang di sekitar batas (Harikumar *et al*, 2013).

Electrical Capacitance Tomography (ECT) merupakan metode untuk mencitrakan bagian dalam suatu bahan atau di dalam suatu tabung tanpa merusaknya dengan memanfaatkan sifat dielektrik di dalam bahan atau tabung tersebut. Sistem ECT dasar terdiri dari sensor kapasitansi dan alat ukur. Citra yang dihasilkan dalam sistem ini dapat digunakan untuk diagnosis dan kontrol pada

proses industri atau penelitian tanpa merusak bahan atau bejana yang digunakan sehingga dapat meminimalisir kerugian produksi (Masturah *et al*, 2015).

ECT memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan portabel (dapat dipindah ke tabung yang lain/materi yang lain). Harga yang dipakai untuk pembuatan ECT cukup tinggi, karena setiap lapisan tabung harus dilapisi dengan lempengan tembaga (Fidos *et al*, 2010). Selain itu sistem pengukurannya terlalu kompleks, yaitu setiap lapisan harus diukur untuk mendapatkan akurasi yang tinggi.

Electrical Resistance Tomography (ERT) merupakan metode perhitungan distribusi resistivitas di bawah permukaan menggunakan pengukuran tegangan dan arus. Pengukuran dilakukan menggunakan elektroda yang ditancapkan di atas tanah yang dirancang sedemikian rupa menggunakan konfigurasi yang ada (Ramirez & Binley, 2000). Penelitian tentang ERT yang digunakan dalam skala kecil sudah pernah dilakukan oleh Butler (2005). Dalam penelitiannya, sistem ERT sama seperti pada umumnya. Penelitiannya memanfaatkan sumber arus yang diinjeksikan dan mengukur beda tegangannya. Sistem yang digunakan pada penelitian oleh Butler (2005) juga memanfaatkan medan listrik, dimana perubahan medan listrik akan mempengaruhi perubahan beda tegangan terukur. Pada penelitiannya elektroda arus dan elektroda tegangan akan disusun secara sejajar, metode ini dinamakan metode *Borehole*.

Pengembangan dari metode *Borehole* adalah metode *Crosshole*. Metode *Crosshole* merupakan metode tomografi yang menggunakan elektroda arus dan elektroda ukur (beda potensial) yang mengapit objek yang akan diukur (Prabowo, 2006). Jarak antar elektroda harus tidak jauh lebih kecil daripada jarak antara *Borehole*. Hal ini dikarenakan data yang terbaca adalah material yang berada disekitar elektroda bukan material yang berada diantara *Borehole* (Loke, 2001).

Penelitian ini merupakan penggabungan kedua sistem tersebut. Penggabungan dilakukan dengan menggunakan metode *Electrical Resistance Tomography* (ERT) yaitu *Borehole* dibentuk menyerupai *Electrical Capacitance Tomography* (ECT) dalam bentuk juga fungsinya. Penelitian ini menggunakan sistem *Electrical Resistance Tomography* (ERT) dikarenakan sistem ini lebih sederhana daripada sistem lain.

Penggabungan kedua sistem tersebut menyebabkan adanya perbedaan dan persamaan antara sistem ERT pada penelitian ini dengan metode *Borehole* dan metode ECT. Perbedaan penelitian ini dengan metode *Borehole* adalah pada penggunaan elektroda. Jika pada metode *Borehole* memasang elektroda secara sejajar, sedangkan penelitian ini memasang elektroda secara melingkar. Penggunaan elektroda yang seperti ini menyerupai sistem ECT, dimana pada sistem ECT tabung akan diselimuti dengan lempengan tembaga. ERT pada penelitian ini memanfaatkan portabilitas yang dimiliki oleh ECT. Dimana sistem ERT pada penelitian ini berukuran kecil, sehingga mudah untuk membawa dan menggunakannya ditempat yang berbeda.

Penelitian ini dilakukan dengan menginjeksikan tegangan *input* DC (*Direct Current*) kepada dua titik elektroda sehingga dapat membangkitkan medan listrik di sekitar elektroda yang bertegangan. Penelitian ini memanfaatkan medan listrik yang mengalir di sekitar tegangan dan mengukur beda potensial antara satu elektroda dengan elektroda yang lain. Medan listrik merupakan ruang yang berada dekat dengan objek bertegangan. Material yang berada di dekat atau ada diantara medan listrik memiliki pengaruh terhadap medan listrik tersebut. Di saat kita meletakkan material konduktor, elektron bebas yang terdapat di dalamnya akan berpindah dengan mudahnya. Hal ini berbeda di saat kita menggunakan bahan isolator, maka elektron akan berbalik arah atau berbelok arah karena isolator tidak memiliki elektron bebas di dalamnya (Abdullah, 2017).

Menurut pernyataan di atas, medan listrik akan berubah di saat dalam tabung yang digunakan pada penelitian ini diberikan material yang dapat mengganggu medan listrik tersebut. Dikarenakan pengukuran resistivitas tidak dapat diukur secara langsung pada penelitian ini, maka dari itu digunakan pengukuran beda tegangan antara elektroda. Pengukuran beda tegangan dilakukan karena menurut hukum Ohm, beda tegangan merupakan hasil kali dari arus dan resistansi. Karakteristik I-V pertama kali dibahas oleh 'Ohm, dan sekarang dikenal dengan hukum 'Ohm. Hukum 'Ohm berbunyi "Besar arus yang mengalir dalam suatu rangkaian elektronika berbanding lurus dengan besar tegangannya dan berbanding terbalik dengan besar hambatannya" (Robertson, 2008). Material pada umumnya

memiliki kemampuan menahan arus listrik. Kemampuan ini dalam bidang elektronika dinamakan sebagai resistansi yang memiliki simbol R . Sekumpulan benda yang memiliki tingkat resistansi yang tinggi diberi nama isolator (Alexander & Sadik, 2009).

Berdasarkan penjelasan di atas maka didapatkan beberapa hipotesa yang akan dibahas pada penelitian ini. Hipotesa pertama adalah adanya perubahan tegangan disaat diberikan penghalang atau benda di dalam wadah. Hipotesa kedua adalah kondisi tegangan terukur akan berbeda disaat posisi benda/material dipindah. Hipotesa ketiga adalah kondisi tegangan terukur akan berbeda disaat konfigurasi pengukuran berubah.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan wadah homogen yang kecil sehingga dapat memindahkannya dengan mudah. Penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan metode ERT agar dapat menjadi alat yang portabel. Permasalahan yang didapat pada penelitian ini adalah bagaimana pola beda tegangan terukur yang terjadi terhadap seluruh elektroda dengan menggunakan konfigurasi pengukuran yang sudah dibuat secara homogen dan heterogen?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang didapat pada penelitian ini adalah mengetahui pola beda tegangan terukur yang terjadi terhadap seluruh elektroda dengan menggunakan konfigurasi pengukuran yang sudah dibuat secara homogen dan heterogen.

1.4 Manfaat Penelitian

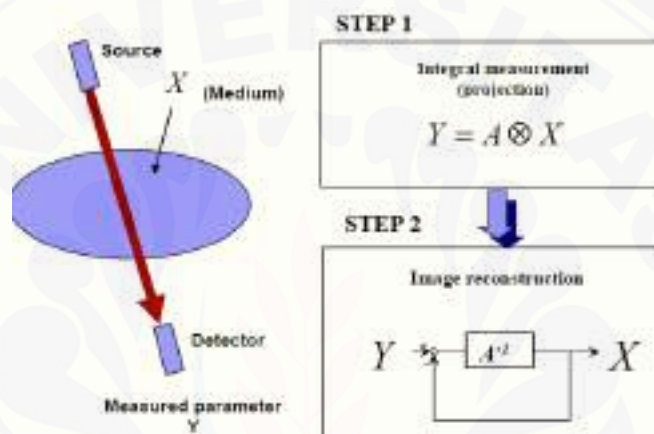
Manfaat yang diharapkan dapat dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Memberikan sumbangsih di bidang ilmu fisika instrumentasi di bidang tomografi untuk penelitian lebih lanjut.
2. Hasil penelitian dapat memberikan informasi berupa adanya atenuasi sinyal yang terjadi pada ERT, sehingga dapat dikembangkannya alat atau *device* yang dapat digunakan dalam kehidupan sehari-hari.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tomografi

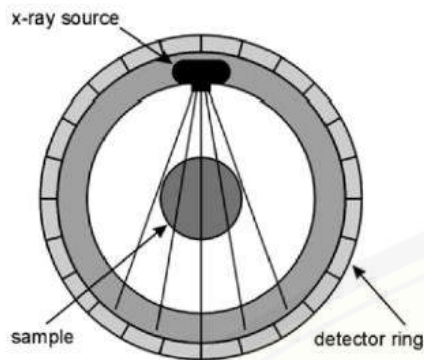
Tomografi merupakan teknik pencitraan struktur dalam benda tanpa merusak benda tersebut. Pencitraan dilakukan dengan memanfaatkan interaksi bahan dalam benda terhadap sinyal yang diinjeksikan dari luar. Perubahan sinyal yang diakibatkan oleh benda, komposisi dan struktur benda tersebut dapat direkonstruksi (Warsito, 2005).



Gambar 2.1 Prinsip tomografi (Sumber: Warsito, 2005)

Pada gambar 2.1 dapat dilihat bahwa prinsip tomografi adalah dengan menembakkan sumber gelombang melewati medium. Setelah melewati medium gelombang akan diterima oleh *detector*. Prinsip tomografi terdiri dari dua tahap. Tahap pertama yaitu melalui pengambilan data dan pendeteksian data. Tahap kedua adalah rekonstruksi untuk menggambarkan hasil pencitraan.

Tomografi pertama kali ditemukan dalam bidang kesehatan oleh Rontgen pada tahun 1895. Rontgen menggunakan sinar-X sebagai sinyal yang diinjeksikan. Dengan memanfaatkan sifat dari sinar-X yang dapat menembus kulit.



Gambar 2.2 Prinsip dari CT-scanner
(Sumber: Cantatore & Müller, 2011)



Gambar 2.3 Alat Medis CT-scanner
(Sumber: Cantatore & Müller, 2011)

Prinsip dari CT-scanner pada gambar 2.2 yaitu dengan menembakkan sinar X dalam sebuah tabung. Medium yang ada di dalam tabung akan mempengaruhi sinar X tersebut. *Detector ring* akan menerima sinar X yang telah ditembakkan. Perubahan sinar X tersebut yang akan dianalisis sehingga dapat mengetahui keadaan didalam CT-scanner. Rontgen menggunakannya sebagai alat untuk melihat keadaan tulang tanpa harus membuka bagian tubuh pasien (Sun *et al*, 2012). Contoh CT-scanner pada zaman modern yang digunakan sebagai alat medis seperti pada gambar 2.3.

Terdapat beberapa metode tomografi berdasarkan sinyal eksitasi yang digunakan, antara lain tomografi optik menggunakan sinar tampak, tomografi elektromagnetik menggunakan gelombang radio, tomografi radiologi menggunakan sinar-X atau sinar gamma, dan tomografi listrik menggunakan deteksi kapasitansi, induktansi dan resistivitas. Kemampuan melakukan pengamatan penampang benda tanpa merusak atau mengubah fisik benda dibutuhkan dalam penerapan industri, kesehatan maupun keamanan (Chiffre *et al*, 2014).

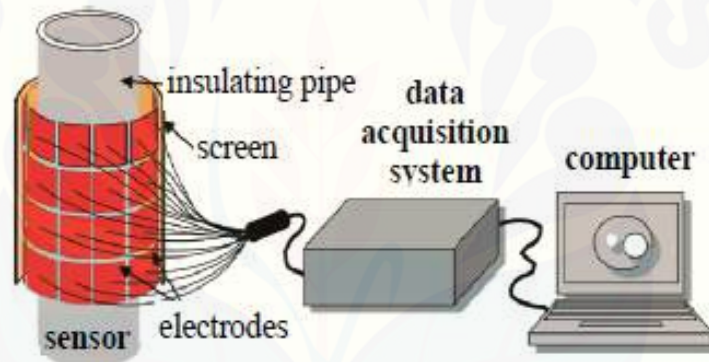
2.2 Electrical Capacitance Tomography (ECT)

Electrical Capacitance Tomography (ECT) merupakan sebuah teknik melihat struktur benda yang memanfaatkan prinsip kapasitor pelat sejajar (Masturah *et al*, 2015). Saat jarak plat dan luas plat dibuat konstan, maka yang berpengaruh

hanyalah konstanta dielektrik diantara plat. Perbedaan nilai konstanta dielektrik inilah yang dianalisis untuk dapat mengolah gambar (Wang *et al*, 2012). Berdasarkan persamaan 2.1 kapasitor, nilai kapasitansi antara dua buah pelat konduktor ditentukan oleh luas, jarak dan permittivitas benda.

$$C = -\frac{1}{v} \iint_{\alpha} \epsilon(x, y) \nabla v(x, y) d\alpha \quad (2.1)$$

Ketika salah satu sisi plat diinjeksi dengan tegangan listrik (V) dan diberikan suatu gangguan berupa material (α). Maka, gangguan tersebut akan menyebabkan nilai permitivitas (ϵ) berubah. Perubahan nilai permitivitas menyebabkan intensitas medan listrik (v) pada benda/ material. Hal inilah yang menyebabkan perbedaan nilai kapasitansi terukur pada pasangan plat konduktor tersebut (Wardhana *et al*, 2017).

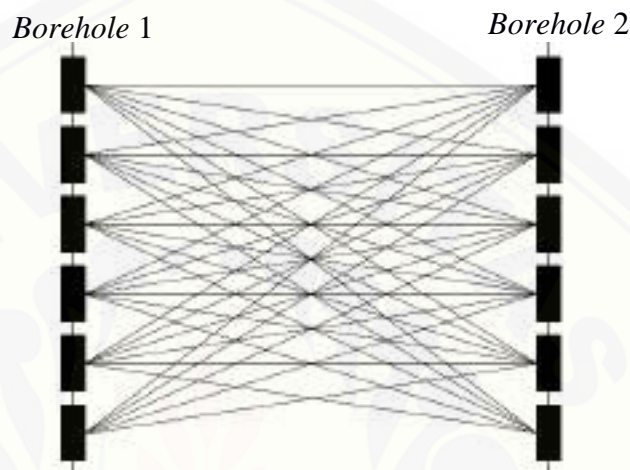


Gambar 2.4 Rancang Bangun Electrical Capacitance Tomography
(Sumber: Zhou *et al*, 2015)

Rancang bangun ECT pada gambar 2.4 terdiri atas 3 implementasi. Diantaranya adalah sensor, akuisisi data dan *display*. Sensor adalah tabung yang telah dilapisi dengan lempeng tembaga yang berfungsi sebagai plat sejajar untuk mendapat konstanta dielektrik. Akuisisi data merupakan pengolahan data yang didapat dalam bentuk konstanta dielektrik dan mengolahnya untuk mendapatkan gambar keadaan didalam tabung. Pengolahan data tersebut memanfaatkan perbedaan konstanta dielektrik disetiap keadaan

2.3 Metode *Crosshole*

Metode *Crosshole* merupakan salah satu metode dalam tomografi yang dilakukan dengan menggunakan elektroda sumber (titik sumber arus) dan elektroda potensial (titik ukur) yang ditempatkan di bawah permukaan pada dua borehole yang terpisah secara horizontal.



Gambar 2.5 Metode *Crosshole* (Prabowo, *et al*, 2006)

Metode *Crosshole* merupakan suatu teknik penggambaran yang menggunakan sejumlah elektroda dalam lubang bor yang dapat menggambarkan distribusi resistivitas di dalam tanah. Metode ini dapat digunakan dengan berbagai susunan elektroda arus-potensial, seperti susunan pole-pole, polebipole, bipole-pole, bipole-bipole (dipole-dipole) (Zhou dan Greenhalg, 2000).

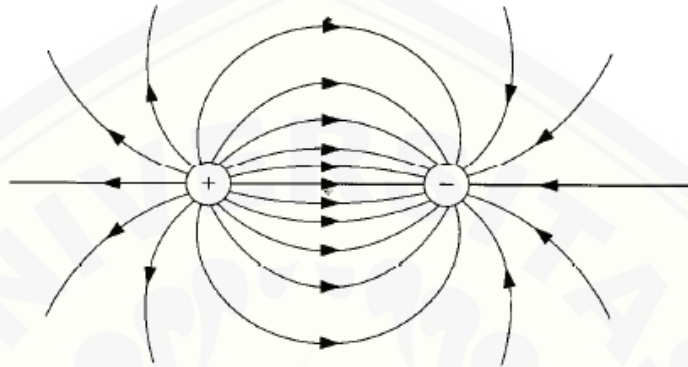
2.4 Medan listrik

Medan listrik merupakan ruang atau daerah yang masih dipengaruhi oleh gaya listrik. Medan listrik adalah daerah yang dipengaruhi sifat kelistrikan dari muatan. Jika kita memberikan muatan, maka akan timbul gaya Coulomb. Persamaan 2.2 adalah persamaan untuk mengukur kuat medan listrik.

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (2.2)$$

Dimana E adalah medan listrik, F adalah gaya elektrostatis, dan q adalah muatan listrik (Thide, 2011).

Arah medan listrik yaitu menjauhi sumber positif dan mendekati sumber negatif. Gaya pada muatan listrik positif bergerak menjauhi sedangkan gaya pada muatan negatif bergerak mendekati, gaya yang ditimbulkan oleh muatan listrik bergerak dari muatan positif ke muatan negatif (Griffith, 1999), hal ini dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Garis-garis medan listrik disaat memiliki muatan yang berbeda kutub (Sumber: Griffith, 1999)

Garis-garis medan listrik pada gambar 2.6 memiliki jumlah garis medan listrik yang meninggalkan muatan positif sama dengan jumlah garis medan listrik yang masuk ke muatan negatif.

2.5 Hukum Ohm

Hukum Ohm merupakan hukum dasar dari ilmu listrik yang sangat berguna untuk menyelesaikan berbagai masalah rangkaian listrik. Hukum 'Ohm menyatakan bahwa besarnya arus yang mengalir pada rangkaian tertutup berbanding lurus terhadap tegangan dan berbanding terbalik terhadap tahanan. Muatan listrik dapat mengalir dari satu tempat ke tempat lain karena adanya beda potensial. Tempat yang memiliki potensial tinggi melepaskan muatan ke tempat yang memiliki potensial rendah. Hukum 'Ohm dapat dinyatakan seperti persamaan 2.3.

$$\mathbf{V = I \times R} \quad (2,3)$$

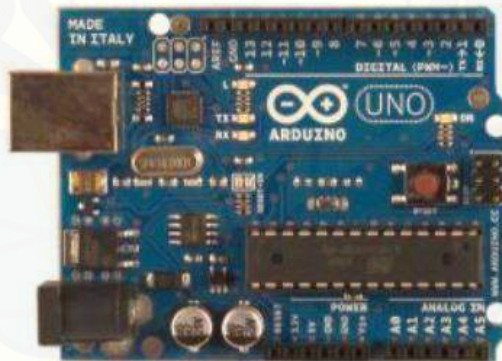
dimana nilai V (Volt) adalah tegangan, I (A) adalah arus dan R (Ω) adalah nilai hambatan (Abdullah, 2017).

2.6 Isolator

Setiap material memiliki hambatan listrik. Hambatan listrik yang dimiliki setiap material tidaklah sama. Material yang memiliki nilai hambatan yang tinggi dinamakan sebagai isolator. Isolator merupakan suatu bahan yang sulit menghantar muatan listrik. Dalam bahan isolator, elektron pada setiap atom diikat dengan kuat sehingga pada keadaan normal elektron tidak bebas bergerak. Karena elektron tidak mudah berpindah, maka isolator sulit mengalirkan arus listrik (Abdullah, 2017).

2.7 Arduino

Arduino merupakan sebuah platform *physical computing* yang bersifat *open source*. *Physical computing* adalah teknik membuat sebuah sistem atau perangkat fisik dengan menggunakan *software* dan *hardware* yang sifatnya interaktif yaitu dapat menerima rangsangan dari lingkungan dan merespon balik. Penampakan arduino UNO seperti pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Arduino UNO (Sumber: Quer, 2017)

Arduino dikatakan platform dikarenakan Arduino tidak hanya sekedar sebuah alat pengembangan, tetapi merupakan gabungan dari *hardware*, bahasa pemrograman dan *Integrated Development Environment (IDE)* yang canggih. IDE merupakan sebuah *software* yang sangat berperan untuk menulis program, meng-*compile* menjadi kode biner dan meng-upload ke dalam *memory microcontroller* (Quer, 2014).

2.8 Arduino MEGA

Arduino UNO merupakan platform arduino yang menggunakan *microcontroller* berbasis ATmega328 sedangkan Arduino MEGA merupakan platform Arduino yang lebih canggih. Arduino MEGA menggunakan *microcontroller* berbasis ATmega2560.



Gambar 2.8 Arduino MEGA (Sumber: Handayani, 2017)

Menurut gambar 2.8 Arduino MEGA memiliki 54 pin digital *input/output* (dimana 14 pin dapat digunakan sebagai keluaran PWM), 16 pin input analog, 2 UARTs (*Hardware serial ports*), sebuah *crystal oscillator* 16 MHz, sebuah penghubung USB, sebuah port yang terhubung dengan listrik, ICSP header, dan tombol kembali. Tegangan input maksimal yang dapat diterima oleh Arduino adalah 6-20V, namun tegangan yang disarankan adalah 7-12V (Handayani, 2017).

2.9 Metode Beda Hingga

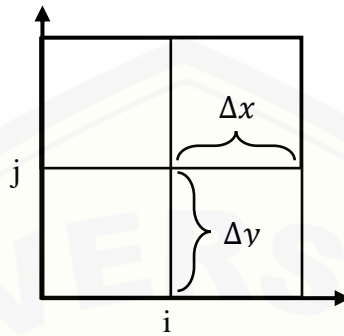
Metode beda hingga merupakan metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial parsial secara numerik. Persamaan differensial merupakan persamaan yang memiliki 2 atau lebih variabel. Metode beda hingga merupakan metode untuk mentransformasikan persamaan differensial parsial ke bentuk beda hingga menggunakan deret Taylor (Darajat, 2013). Menurut Kowalik dan Murty (1993), contoh deret Taylor sebagai berikut:

$$f(x \pm \Delta x) = f(x) \pm \frac{\Delta x}{1!} f'(x) + \frac{\Delta x^2}{2!} f''(x) \pm \frac{\Delta x^3}{3!} f'''(x) + \dots \quad (2.4)$$

Deret Taylor pada persamaan 2.4 diputus pada orde 2 sehingga didapat persamaan sebagai berikut:

$$f''(x) = \frac{f(x+\Delta x) - 2f(x) + f(x-\Delta x)}{\Delta x^2} \quad (2.5)$$

Menurut Kowalik dan Murty (1993), pemodelan numerik pada metode beda hingga membutuhkan *grid* yang menggambarkan daerah yang ditinjau.



Gambar 2.9 *Grid* untuk pemodelan numerik (Sumber: Kowalik dan Murty, 1993)

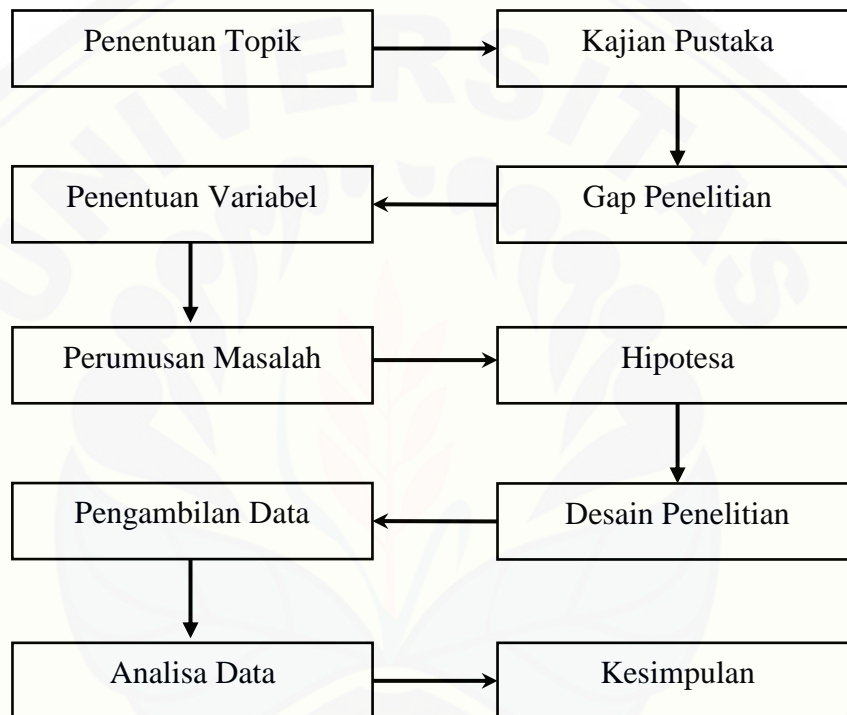
Memfaatkan persamaan 2.5 maka didapatkan persamaan untuk penyelesaian numerik seperti berikut:

$$f''(x) = \frac{f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad (2.6)$$

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Jember. Waktu pelaksanaan penelitian mulai dari Bulan Maret 2019 sampai selesai. Penelitian ini merupakan aplikasi metode *Borehole* yang lebih kecil seperti pada metode ECT.



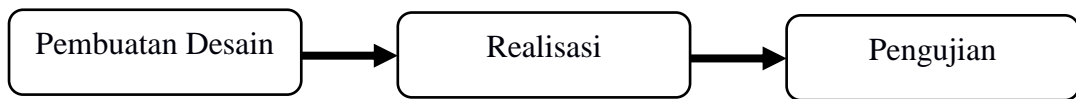
Gambar 3.1 Rancangan penelitian

Penelitian ini diawali dengan penentuan topik. Penentuan topik adalah untuk mengetahui topik yang harus dikembangkan agar dapat digunakan. Setelah topik ditentukan yaitu ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) maka dilakukan kajian pustaka. Kajian pustaka berfungsi supaya alat yang akan dibuat sesuai dengan teori dan referensi yang ada. Hasil dari kajian pustaka salah satunya adalah referensi alat yang hampir sama. Berdasarkan referensi tersebut akan ditentukan gap penelitian. Referensi yang menjadi acuan pada penelitian ini diantaranya adalah metode *Borehole* dalam geofisika dan penggunaan tomografi yang menggunakan kapasitansi dalam bidang industri. Penelitian ini memanfaatkan metode *Borehole*

dengan membuatnya dalam bentuk portabel seperti pada metode ECT sehingga dapat digunakan dalam bidang industri lebih tepatnya dalam pencampuran bahan. Gap penelitian yang sudah ditentukan menghasilkan beberapa hal diantaranya adalah variabel, rumusan masalah dan hipotesa. Melihat variabel dan rumusan masalah yang ada serta membandingkannya dengan teori yang ada, maka dihasilkan hipotesa bahwa akan adanya perubahan tegangan disaat diberikan penghalang atau benda di dalam tabung penelitian. Hipotesa kedua adalah kondisi tegangan terukur akan berbeda disaat posisi benda/material dipindah. Penelitian ini dilanjutkan dengan pembuatan desain, diantaranya adalah desain arsitektur, instrumentasi dan akuisisi. Desain arsitektur merupakan desain dari bentuk ERT yang akan dibuat. Desain instrumentasi merupakan desain untuk rangkaian instrumentasi mulai dari rangkaian *input* sampai ke pengukuran. Desain akuisisi data merupakan desain untuk pengukuran. Setelah desain dan realisasi sudah dilakukan selanjutnya adalah pengambilan data. Pengambilan dilakukan dengan menggunakan beberapa pengujian. Pengujian diawali dengan pengujian alat tanpa adanya material, ada material dan disaat material dipindah posisinya.

3.2 Kerangka Pemecahan Masalah

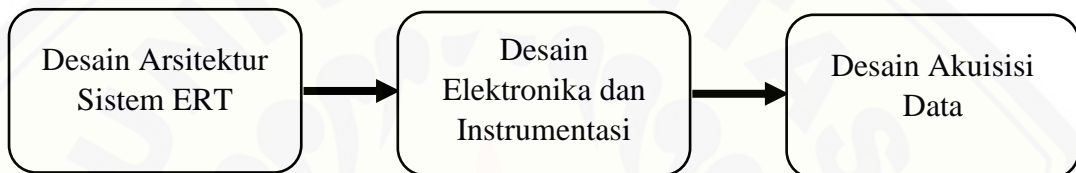
Penelitian ini memiliki 3 tahapan besar, yaitu pembuatan desain, realisasi dan pengujian. Alat akan didesain sedemikian rupa sehingga dapat digunakan sesuai dengan keinginan. Desain yang sudah disiapkan tersebut direalisasikan, mulai dari pengadaan bahan sampai ke perancangan alat. Alat yang sudah dibuat kemudian diuji menggunakan 3 metode uji, diantaranya pengujian di saat tidak ada material di dalamnya, pengujian di saat ada material di dalamnya dan di saat material dipindah serta disaat bahan yang digunakan berbeda. Implementasi penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Implementasi penelitian

3.2.1 Pembuatan Desain

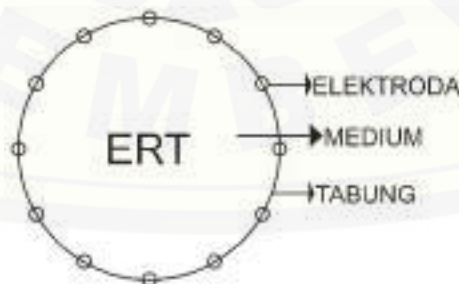
Desain yang akan digunakan pada penelitian ini memiliki 3 desain dasar. Desain dasar tersebut diantaranya adalah desain arsitektur, desain elektronika dan instrumentasi serta desain akuisisi data. Kerangka pembuatan desain ditunjukkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Kerangka pembuatan desain

a. Desain Arsitektur sistem ERT

Desain arsitektur pada penelitian ini merupakan penggabungan antara metode *Borehole* dan (ECT). Penggabungan ini dilakukan dengan menggunakan elektroda sebagai *input* dan *output* sama seperti pada geolistrik, elektroda tersebut akan mengelilingi permukaan tabung penelitian sama seperti pada (ECT). Hal ini ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Desain arsitektur

Gambar 3.4 merupakan desain arsitektur sensor. Desain arsitektur sensor terdiri dari elektroda, medium dan tabung.

1) Elektroda

Penelitian ini menggunakan elektroda sebagai media *input* dan *output*nya. Elektroda yang digunakan memiliki kesamaan dalam jenis bahan juga fungsinya dengan elektroda yang digunakan pada geolistrik, hanya saja elektroda yang digunakan pada penelitian ini lebih kecil. Elektroda yang digunakan pada penelitian ini memiliki luas permukaan sebesar 2.5 mm^2 dan memiliki panjang 5 cm. Penelitian ini menggunakan elektroda dengan bahan tembaga. Tembaga dipilih karena selain mudah ditemukan dan harganya yang terjangkau, tembaga juga merupakan konduktor listrik yang baik. Hal inilah yang menyebabkan kabel listrik menggunakan bahan yang terbuat dari tembaga. Elektroda yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.5 dan 3.6.



Gambar 3.5 Model bentuk elektroda



Gambar 3.6 Penampakan elektroda

2) Medium

Penelitian menggunakan listrik sebagai sistem utamanya. Listrik membutuhkan medium untuk mengalir, karena inilah penelitian ini menggunakan medium supaya listrik dapat mengalir. Medium yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah dan air. Penggunaan beberapa jenis medium adalah untuk mengetahui sistem dapat berjalan di medium yang memiliki nilai resistivitas yang berbeda.

3) Tabung

Tabung penelitian yang digunakan pada penelitian ini merupakan tabung penelitian homogen. Jenis bahan yang digunakan adalah jenis bahan isolator. Jenis bahan isolator digunakan karena jenis bahan ini tidak dapat atau sulit menghantarkan listrik. Jenis bahan ini dipilih agar meminimalisir adanya arus listrik

yang mengalir melalui tabung penelitian tersebut. Gambar 3.7 dan 3.8 menunjukkan desain tabung penelitian dan penampakan tabung penelitian.



Gambar 3.7 Desain tabung penelitian



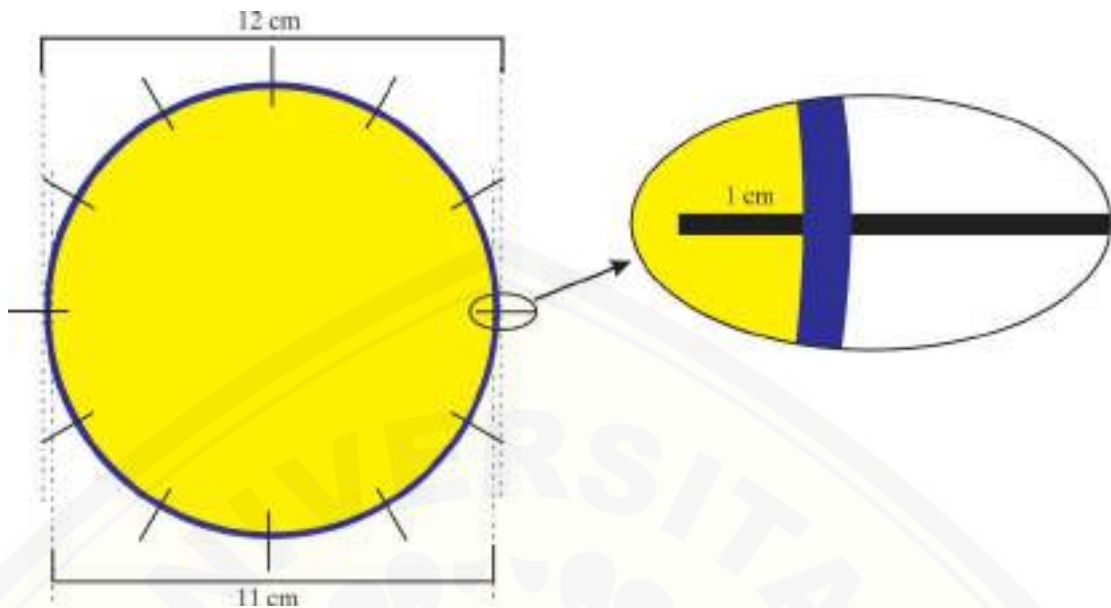
Gambar 3.8 Penampakan tabung penelitian

Elektroda pada Gambar 3.5 dan 3.6 dipasang pada tabung dengan cara melubangi tabung dan memasukkan elektroda ke lubang tersebut.



Gambar 3.9 Peletakan elektroda pada tabung tampak samping

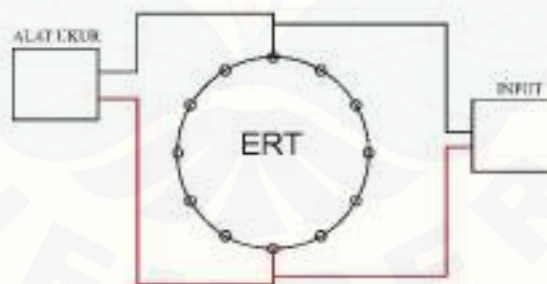
Gambar 3.9 merupakan desain setelah elektroda diletakkan menembus tabung. Tabung penelitian pada Gambar 3.8 dilubangi dengan bor kecil. Lubang kecil digunakan untuk meletakkan elektroda pada Gambar 3.6 sehingga dapat menembus tabung. Setelah itu diberikan *sealer*, *sealer* digunakan untuk menutup kebocoran. Desain peletakan elektroda pada tabung penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Peletakkan elektroda pada tabung tampak atas

b. Desain Elektronika dan Instrumentasi

Desain elektronika dan instrumentasi merupakan desain rangkaian yang akan digunakan. Desain ini meliputi rangkaian *input*, ERT dan alat ukur. Desain Gambar elektroda dan instrumentasi yang terdiri dari *input*, ERT dan alat ukur dijelaskan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Desain elektronika dan instrumentasi

1) *Input*

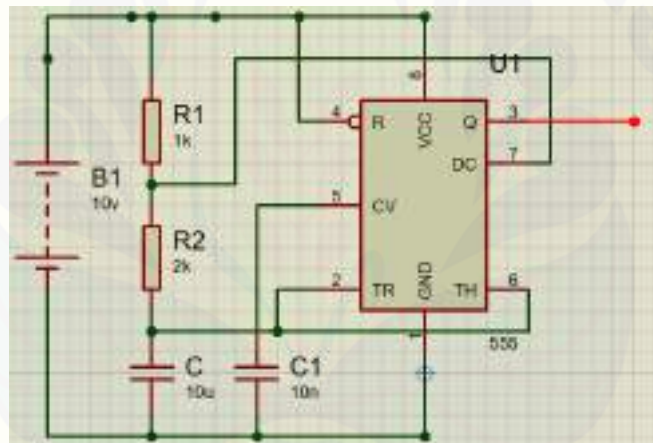
Penelitian ini merupakan penggabungan dari metode *Borehole* dan ECT. Kedua metode tersebut memiliki kesamaan, yaitu harus diinjeksi dengan tegangan atau arus. Penelitian ini menggunakan tegangan sebagai *input*. Tegangan yang digunakan pada penelitian ini sebesar 10 V. Tegangan yang diberikan merupakan tegangan pulsa. Penggunaan tegangan pulsa dikarenakan untuk meminimalisir

adanya efek polarisasi. Efek polarisasi terjadi karena momen dipole berusaha untuk *alignment* atau berada dalam garis lurus satu sama lain. *Alignment* ini menyebabkan timbulnya *source* baru (Haus dan Jamer, 1989).



Gambar 3.12 Bentuk pulsa kotak

Pulsa kotak pada Gambar 3.12 merupakan bentuk sinyal yang terdiri dari tegangan tinggi dan *ground*. Tegangan tinggi merupakan puncak sinyal. *Ground* berada pada dasar sinyal. Bagian *input* menggunakan rangkaian timer yang dipacu oleh IC timer NE555. NE555 digunakan untuk membangkitkan tegangan pulsa kotak yang akan digunakan sebagai *input* untuk alat ERT.

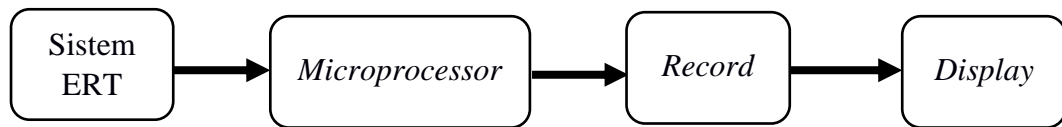


Gambar 3.13 Rangkaian osilator

Gambar 3.13 merupakan Gambar rangkaian yang digunakan untuk mendapat pulsa kotak seperti pada Gambar 3.12. Rangkaian pada Gambar 3.13 merupakan rangkaian osilator.

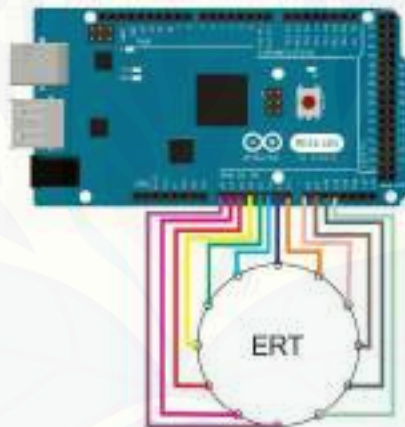
2) Alat ukur

Alat ukur yang digunakan pada penelitian ini menggunakan sistem kontrol otomatis. Sistem ini memanfaatkan *microprocessor* sebagai pusat kendali. Sistem ini digunakan agar pengambilan data dapat berjalan dengan cepat. Alur pengukuran akan dijelaskan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Kerangka pembuatan desain

Menurut Gambar 3.14 sistem ERT akan disambungkan dengan *microprocessor* yang sudah dirancang sehingga dapat melakukan pengukuran sesuai dengan yang diinginkan. Setelah melakukan pengukuran, data akan ditunjukkan dalam bentuk tabel. *Microprocessor* yang digunakan pada penelitian ini adalah Arduino MEGA. Pemilihan Arduino ini dikarenakan pada penelitian ini membutuhkan kaki *Input/Output* analog yang banyak untuk digunakan sebagai pengukur tegangan. Rangkaian untuk *microprocessor* ditunjukkan pada Gambar 3.15.

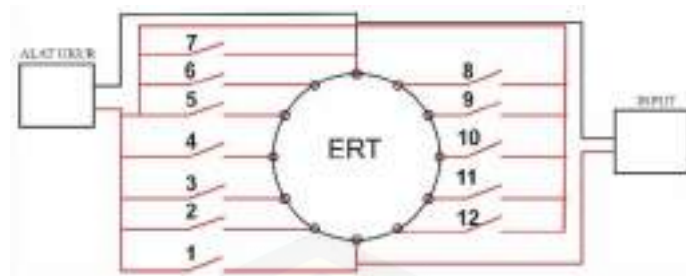


Gambar 3.15 Rangkaian pengukur tegangan menggunakan arduino MEGA

Pada Gambar 3.15 pin *input* yang digunakan Arduino merupakan pin analog. Penggunaan pin analog karena tegangan merupakan sinyal analog sehingga tidak dapat menggunakan pin *digital*.

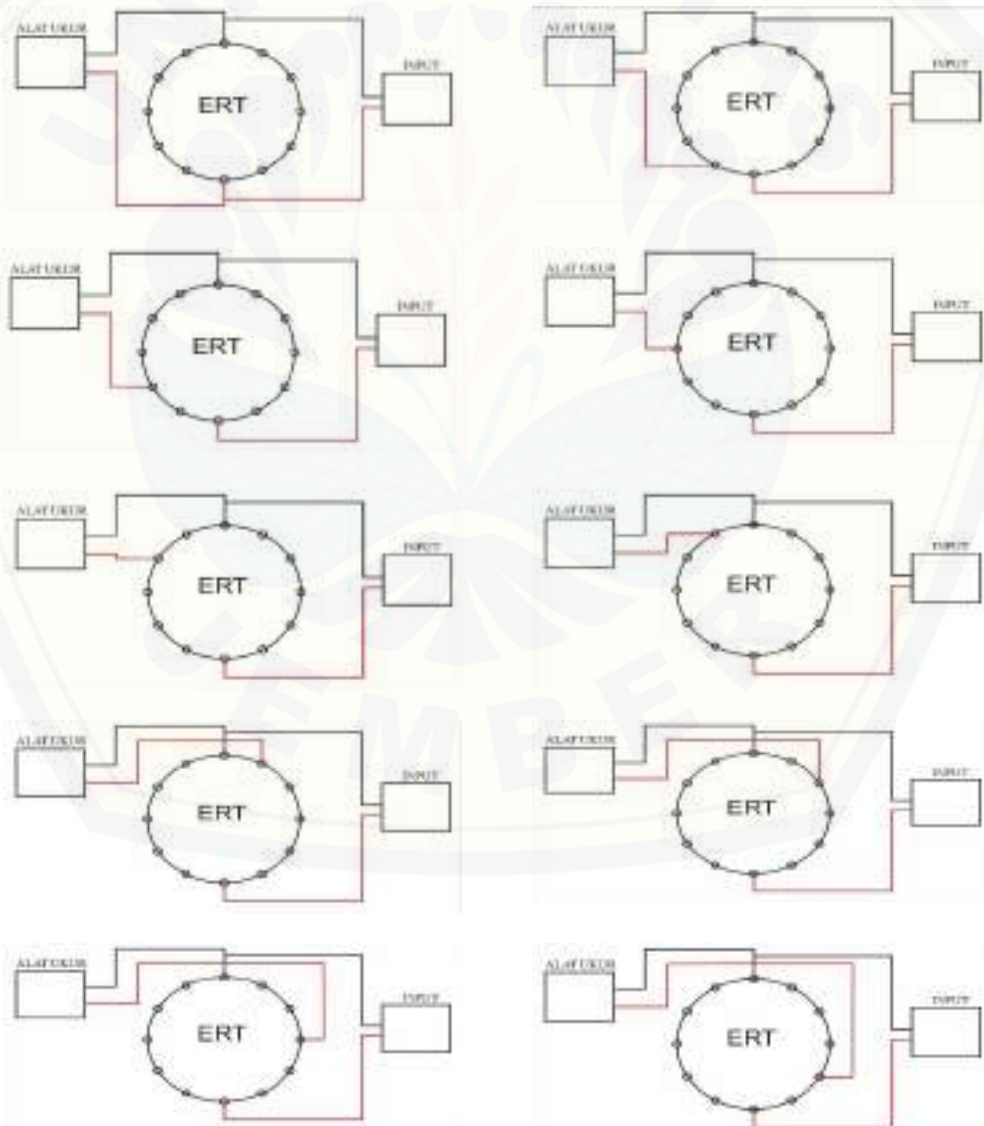
c. Desain Akuisisi Data

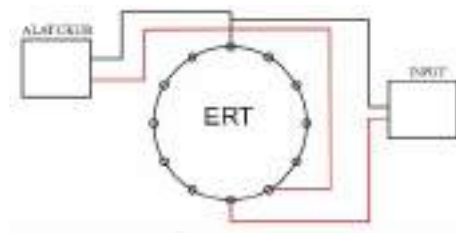
Desain akuisisi data merupakan teknik pengukuran. Sistem pengukuran pada penelitian ini adalah mengukur beda potential antara satu elektroda dengan elektroda yang lain. Desain akuisisi data dijelaskan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Desain akuisisi data saat elektroda *output* dipindah-pindah

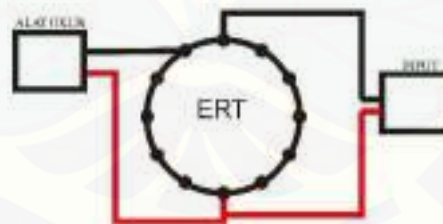
Setiap elektroda akan dihubungkan dengan *microprocessor*. Desain akuisisi data pada saat elektroda *output* dipindah memiliki 11 langkah yang berbeda diantaranya adalah:





Gambar 3.17 Desain Pengukuran pada Base 1

Desain pengukuran pada Gambar 3.17 dilakukan dengan mengukur beda tegangan antara dua elektroda. Pengukuran beda tegangan ini menggunakan sistem *Rover and Base* (RnB). *Base* adalah elektroda ukur yang berfungsi sebagai titik ukur yang tetap. *Base* adalah garis hitam yang terhubung dengan alat ukur. *Rover* adalah elektroda ukur yang berfungsi sebagai titik ukur yang berpindah. *Rover* adalah garis merah yang terhubung dengan alat ukur. Langkah pertama adalah RnB disambungkan dengan elektroda *input* dan *ground*. Elektroda yang terhubung dengan *ground* merupakan *base*-nya yaitu garis yang dihubungkan dengan garis hitam. Elektroda yang terhubung dengan *input* sebagai *rover*-nya yaitu garis yang dihubungkan dengan garis merah. Langkah kedua adalah memindahkan *rover* sehingga seluruh elektroda dapat berfungsi sebagai *rover*. Langkah ketiga adalah dengan memindahkan *base*-nya ke elektroda yang lain seperti pada Gambar 3.28.



Gambar 3.18 Desain pengukuran pada base 2

Setelah memindah *base*, selanjutnya adalah memindahkan *rover*-nya. Pengukuran RnB ini terus dilakukan sampai seluruh elektroda bisa berfungsi sebagai *base* dan *rover*.

3.2.2 Realisasi

Realisasi merupakan bagian dimana setiap desain akan direalisasikan. Realisasi ini diawali dengan pembuatan arsitektur ERT sesuai dengan desain

arsitektur. Realisasi dimulai dari persiapan alat dan bahan juga perancangannya. Pada penelitian ini elektroda akan menembus permukaan tabung, sehingga elektroda tersebut dapat berinteraksi dengan medium yang ada. Elektroda tersebut akan disambungkan dengan *microprocessor* dan juga input menggunakan kabel.

3.2.3 Pengujian

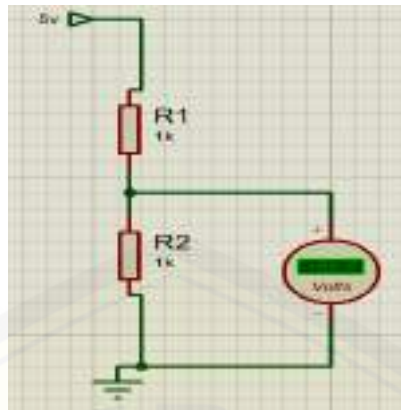
Pada penelitian ini pengujian terjadi pada keseluruhan sistem dan sub-sistem. Pengujian dilakukan pengulangan sebanyak sepuluh kali, pengulangan dilakukan untuk mendapatkan data yang lebih banyak dan semakin akurat. Beberapa pengujian tersebut adalah sebagai berikut:

a. Pengujian *input*

Input yang digunakan pada penelitian ini merupakan keluaran dari rangkaian *timer* NE555 pada Gambar 3.13. Pengujian dilakukan untuk mengetahui rangkaian tersebut agar sesuai dengan yang diinginkan. Metode pengujian untuk rangkaian ini dilakukan dengan menggunakan osiloskop. Osiloskop merupakan alat untuk memvisualisasikan gelombang. Hasil yang didapat pada pengujian *input* adalah frekuensi dan tegangan *input*.

b. Pengujian Alat Ukur

Alat ukur yang digunakan pada penelitian ini adalah alat ukur berbasis *microcontroller*. *Microcontroller* yang digunakan adalah Arduino MEGA. Pengujian alat ukur ini dilakukan dengan memanfaatkan rangkaian pembagi tegangan. Rangkaian yang digunakan untuk pengujian alat ukur ini seperti pada Gambar 3.19.

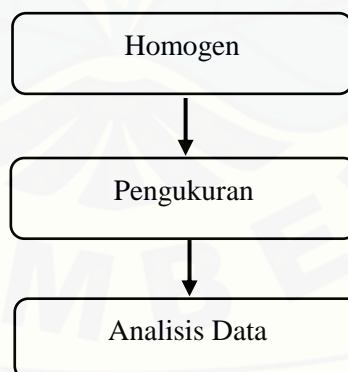


Gambar 3.19 Rangkaian pengujian alat ukur dengan pembagi tegangan

Berdasarkan Gambar 3.19 *Output* dari rangkaian pada Gambar 3.19 adalah garis yang berada antara R1 dan R2 atau garis yang terhubung dengan Voltmeter. *Output* akan dihubungkan dengan 2 alat ukur. Alat ukur yang digunakan adalah alat ukur berbasis Arduino dan alat ukur AVO Meter (Xiole DT9205A). AVO Meter digunakan sebagai pembanding apakah alat ukur berbasis Arduino sesuai dengan alat ukur yang sudah ada.

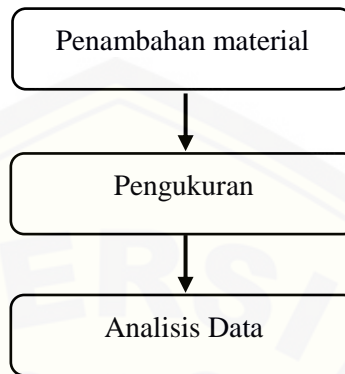
c. Pengujian ERT

Pengujian ini dilakukan dalam 2 tahap yaitu secara homogen dan heterogen.



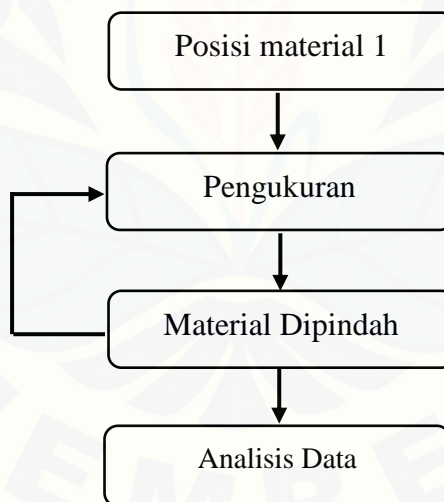
Gambar 3.20 Pengujian secara homogen

Pada Gambar 3.20 alat ini akan diuji di saat tanpa material pengganggu di dalamnya. Pengujian dilakukan dengan menerapkan keseluruhan jenis pengukuran. Data hasil pengukuran selanjutnya diplot dalam bentuk grafik.



Gambar 3.21 Pengujian secara heterogen

Tahap kedua adalah penambahan material pengganggu dan materialnya dipindah. Hal ini dijelaskan pada Gambar 3.22.



Gambar 3.22 Perubahan posisi material

Gambar 3.22 merupakan tahap dimana material yang sudah ditaruh di dalam alat akan dipindah. Pengukuran dilakukan kembali setelah memindah material. Pemindahan material ini untuk mengetahui terjadinya atenuasi sinyal yang sesuai di saat material yang ada di dalamnya bergerak atau pindah, sehingga jika digunakan dalam bidang industri terutama pada tabung pencampuran dapat diketahui jenis bahan yang ada di dalam tabung tersebut secara *real time*.

3.3 Metode Analisis Data

3.3.1 Penentuan Beda Tegangan

Pengukuran beda tegangan menggunakan Arduino hanya dapat dilakukan di PIN analog. Pengukuran beda tegangan dilakukan dengan mengukur beda tegangan elektroda terukur dengan *ground*. Pengukuran seperti ini dilakukan dikarenakan *script* Arduino yang digunakan hanya dapat melakukan pengukuran suatu titik terhadap *ground*. Hal inilah yang menyebabkan penelitian ini menggunakan persamaan 3.1 untuk melakukan konfigurasi pengukuran seperti pada subbab 3.2.1.c.

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad (3.1)$$

dimana ΔV : Beda Tegangan (Volt)

V_1 : Tegangan terukur pada elektroda *base* (Volt)

V_2 : Tegangan terukur pada elektroda *rover* (Volt)

3.3.2 Presisi

Analisa data yang digunakan pada penelitian ini adalah analisa presisi data. Analisa presisi data dilakukan pada penelitian ini dikarenakan penelitian ini melakukan pengulangan. Agar mendapat data yang baik, maka diperlukan tingkat presisi yang tinggi. Presisi adalah hasil dari pengulangan pengukuran hampir sama ataupun sama.

$$Presisi = \left(1 - \left|\frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}}\right|\right) \times 100\% \quad (3.2)$$

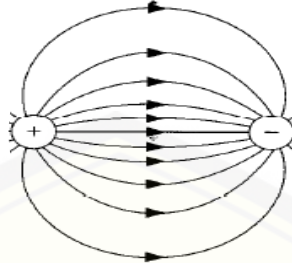
dimana x_i : Nilai hasil perhitungan (Volt)

\bar{x} : Nilai rata rata hasil perhitungan (Volt)

3.3.3 Kesimpulan yang diharapkan

Kesimpulan yang diharapkan pada penelitian ini adalah grafik pola beda tegangan terukur. Kesimpulan yang diharapkan pada penelitian ini adalah adanya perbedaan tegangan disaat *rover* yang berbeda. *Rover* yang berada pada atau dekat dengan *input* tegangannya akan lebih besar daripada *rover* yang berada pada atau

dekat dengan *ground*. Kesimpulan harapan ini dapat dibuat dengan memanfaatkan teori tentang medan listrik pada bab 2.



Gambar 3.23 Pola garis-garis medan listrik disaat memiliki muatan yang berbeda kutub (Sumber: Griffith, 1999)

Menurut Gambar 3.23 garis medan listrik yang terbentuk karena adanya 2 muatan. Garis medan listrik memiliki arah pergerakan dari muatan positif ke muatan negatif. Medan listrik inilah menyebabkan adanya *EQ potential*. Garis *EQ potential* adalah garis yang tegak lurus dengan garis medan listrik. Garis *EQ potensial* inilah yang digunakan untuk mendapatkan tegangan terukur.

Kesimpulan yang diharapkan pada saat dilakukan perlakuan yang berbeda diantaranya adalah pada saat tanpa material, ada material dan material dipindah. Nilai tegangan ukur akan mengalami perubahan disaat dilakukan perlakuan tersebut. Beda tegangan terukur yang didapat pada penelitian ini selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik. Pengeplotan dilakukan untuk mempermudah dalam menganalisa pola beda tegangan terukur yang didapat pada setiap kondisi.

3.3.4 Metode Beda Hingga (*Finite Different Method*)

Menurut Hartanto (2008), metode beda hingga merupakan metode yang memanfaatkan matriks yang didapat dari grid beda hingga untuk menunjukkan domain penyelesaian kontinu. Metode beda hingga memanfaatkan persamaan diferensial parsial (PDP) untuk menyelesaikannya. Persamaan pendekatan beda hingga yang didapatkan menggunakan PDP seperti berikut:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \frac{V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1}}{\Delta y^2} \quad (3.5)$$

Penelitian ini menggunakan persamaan Laplace sebagai persamaan dasarnya.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (3.6)$$

Masukkan persamaan 3.4 dan 3.5 ke persamaan 3.6 maka didapatkan persamaan 3.7

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (3.7)$$

dimana V = Tegangan (Volt)

I = Index (x)

J = Index (y)

Δx = Jarak antar grid secara horizontal

Δy = Jarak antar grid secara vertikal

3.3.5 *Fitting, Filter dan FFT (Fast Fourier Transform).*

Fitting dilakukan untuk mempermudah dalam menganalisa data yang didapat. Penelitian ini melakukan *fitting* dengan menggunakan deret Fourier. Menurut Abu (2014) deret Fourier adalah penguraian fungsi periodik menjadi fungsi yang beresilasi. Deret Fourier banyak digunakan dalam menyelesaikan persamaan differensial. Deret Fourier yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

$$y = \sum_{i=0}^{n=8} a_i \cos(ix\omega) + b_i \sin(ix\omega) \quad (3.8)$$

Berdasarkan persamaan 3.8 didapat hasil fitting pada Fourier ke 8. Hasil *fitting* yang didapat dengan menggunakan persamaan 3.8 selanjutnya akan di-*filter*.

Filter dilakukan untuk lebih mempermudah dalam menganalisa perbedaan yang terjadi disaat diberikan perlakuan yang berbeda. *Filter* yang dilakukan pada penelitian ini adalah LPF (*Low Pass Filter*). LPF adalah *filter* yang meloloskan gelombang dengan frekuensi rendah. Hal ini dilakukan untuk mempermudah dalam menganalisa data. Hasil *filter* yang didapat pada penelitian ini selanjutnya akan ditransformasi.

Tranformasi ini dilakukan untuk mengetahui besar amplitudo pada setiap perlakuan yang berbeda. Hal ini dilakukan untuk mengetahui bahwa diperlakuan yang berbeda pola beda tegangan terukur akan memiliki amplitudo yang berbeda Transformasi yang digunakan pada penelitian ini adalah FFT (*Fast Fourier*

Transform). FFT merupakan algoritma yang dapat bekerja cepat untuk menyelesaikan DFT (*Discrete Fourier Transform*).



BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat pada penelitian ini adalah pola beda tegangan terukur pada setiap *rover* berbeda-beda. Semakin dekat posisi *rover* dengan *input* maka nilai beda tegangannya akan semakin besar. Nilai beda tegangan terukur yang terjadi pada setiap *base* juga dipengaruhi posisi dari *base* tersebut. Semakin dekat *base* dengan *input* maka beda tegangan terukur yang didapat akan semakin kecil.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan 2 medium yang berbeda. medium yang digunakan adalah medium air dan medium pasir. Amplitudo pola beda tegangan terukur yang didapat pada saat pengukuran menggunakan medium air lebih besar daripada medium pasir. Hal ini dikarenakan nilai resistivitas air lebih kecil daripada pasir.

Pada setiap medium dilakukan 3 perlakuan. Perlakuan tersebut adalah dengan menambahkan material dan memindahkannya. Penambahan material mempengaruhi pola beda tegangan terukur. Pola beda tegangan terukur sebelum ditambah material nilainya lebih besar daripada saat ditambah material. Hal ini dikarenakan nilai resistivitas dari material mempengaruhi beda tegangan terukur. Pemindahan posisi material juga mempengaruhi nilai dari pola beda tegangan terukur. Semakin dekat posisi material dengan *input* maka beda tegangan terukur semakin kecil.

5.2 Saran

Saran yang dapat penulis ajukan untuk penelitian selanjutnya yaitu :

1. Diharapkan dapat merekonstruksi data yang didapat pada penelitian ini.
2. Diharapkan dapat membuat teknik pengukuran yang lebih *real time*. Hal ini dilakukan agar pengambilan data dapat dilakukan lebih cepat lagi.
3. Diharapkan untuk menggunakan medium yang telah diketahui nilai resistivitasnya. Hal ini guna untuk merancang sistem ERT ini menjadi alat untuk mengukur nilai resistivitas dari medium yang lain. Alat ini juga dapat

dikembangkan dengan memanfaatkan sensor kelembapan untuk mengukur nilai kelembapan dari medium yang lain.

4. Diharapkan dapat membuat alat yang dapat berfungsi sebagai *input* dan juga alat ukur. Hal ini agar sistem ERT ini dapat lebih portabel.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. 2017. *Fisika Dasar II*. Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Abu, H. I., Khalil, R. 2014. Fractional Fourier Series with Applications. *American Journal of Computational and Applied Mathematics*. 4(6): 187-191.
- Alexander, C.K., dan M. N. O. Sadik. 2009. *Fundamentals of Electric Circuits (Fourth Edition)*. McGraw-Hill Companies: New York.
- Butler, D. K. 2005. *Near-Surface Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists: United State Of America.
- Cantatore, A., dan P. Müller. 2011. *Introduction to computed tomography*. Kgs.Lyngby: DTU Mechanical Engineering. Technical University of Denmark: Denmark.
- Chiffre, L. D., S. Carmignato, J. P Kruth, R. Schmitt, dan A. Weckenmann. 2014. Industrial Applications of Computed Tomography. *Elsevier*. 63: 655-657.
- Darajat P. P. 2013. Deskripsi Metode Beda Hingga Untuk Menyelesaikan Persamaan Fitzhugh-nagumo. *Skripsi*. Malang: Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Fidos, H., R. Wajman, R. Banasiak, J. Sowinski, dan D Sankowski. 2010. Application Of Electrical Capacitance Tomography System for Non-Invasive Phase Distribution Detection in Gas-Liquid Mixtures. *Automatyka* 14: 676.
- Griffith, D. J. 1999. *Introduction to Electrodynamics*. New Jersey: United State of America
- Handayani, R. D. 2017. MEGA 2560 R3 Datasheet. www.inhaos.com/uploadfile/otherpic/2560.pdf. [Diakses pada tanggal 6 Februari 2019].
- Harikumar. R., R. Prabu, dan S. Raghavan. 2013. Electrical Impedance Tomography (EIT) and Its Medical Applications: A Review. *International Journal of Soft Computing and Engineering* 3(4): 1.
- Hartanto A. S. 2008. Penyelesaian Numerik Persamaan Laplace dan Persamaan Poisson Dalam Pelat Persegi Panjang dan Pelat Cakram dengan Metode Beda-Hingga. *Skripsi*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.

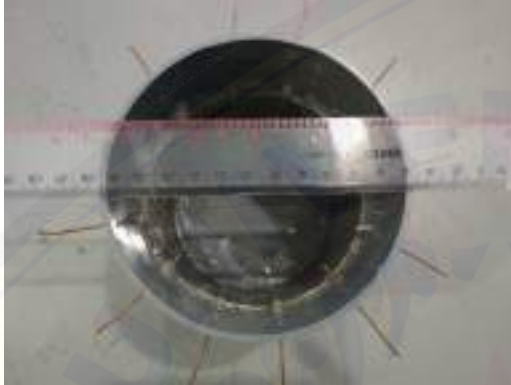
- Haus, H. A. dan Jamer, R. M. 1989. *Electromagnetic Fields and Energy*. Prentice-Hall: New Jersey
- Ishak, S., W.H.F. Rahiman, S.S. Hamzah, L.T. N.A.M. Siow Ali, T.T.W. Kiat, dan V.A.W Neng. 2016. A Review Of Application Electrical Resistance Tomography For Rooted Herb Tree Detection. *Jurnal Teknologi* 78(7):1-2.
- Kowalik, Z., dan Murty, T. S. 1993. *Numerical Modeling of Ocean Dynamics*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd: London.
- Loke, M. H. 2001. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Geotomo Software: Malaysia.
- Masturah, M.T., M.H.F Rahiman, Z. Zakaria, A.R. Rahim, dan N.M. Ayob. 2015. Design of Flexible Electrical Capacitance Tomography Sensor. *Jurnal Teknologi* 77(28): 1-3.
- Prabowo R. E., G. Yuliyanto., M.I. Nurwidyanto. 2006. Pemodelan Tomografi Cross-hole Metode Geolistrik Resistivitas (Bentuk Anomali Silindris). *Berkala Fisika*. 1 (9): 23-26.
- Quer, J. C. 2014. Arduino UNO. <https://datasheet.octopart.com/A000066-Arduino-datasheet.pdf>. [Diakses pada tanggal 6 Februari 2019].
- Ramirez, A. L., dan A. Binley. 2000. Electrical Resistance Tomography. *Research Gate* 17: 573.
- Robertson, C.R. 2008. *Fundamental Electrical and Electronic Principles (Third Edition)*. Elsevier: United Kingdom.
- Subburaj, J. 2011. *CT Scanning – Techniques and Applications*. In-Tech: Croatia.
- Sun, W., S. B. Brown, dan R. K. Leach. 2012. *An Overview of Industrial X-Ray Computed Tomography*. National Physical Laboratory: United Kingdom.
- Telford, W.M., L.P. Goldrat, dan R.P. Sheriff. 1990, *Applied Geophysics 2nd edition*. Cambridge University Pres: Cambridge.
- Thide, B. 2011. *Electromagnetic Field Theory Exercises*. Uppsala: Sweden.
- Wang, H., I. Fedchenia., S. L. Shishkin., A. Finn., L. Smith., M. B Colket. 2012. Image Reconstruction for Electrical Capacitance Tomography Exploiting Sparsity *United Technologies Research Center*. 10: 1-4.

- Wardhana, A., M. Rivai., F. Budiman., dan S. Imam. 2017. Rancang Bangun Tomografi Kapasitansi Listrik dengan Sensor Tersegmentasi dan Berperisai untuk Deteksi Benda Dalam Pipa. *Jurnal Teknik ITS*. 1(6): A64-A70
- Warsito. 2005. Review: Komputasi Tomografi dan Aplikasinya dalam Proses Industri. *Prosiding Semiloka Teknologi Simulasi dan Komputasi Serta Aplikasi*.
- Wijaya, A. S. 2015. Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas Konfigurasi Wenner untuk Menentukan Struktur Tanah di Halaman Belakang SCC ITS Surabaya. *Jurnal Fisika Indonesia*. 19(55): 1-4.
- Zhou, B dan S.A. Greenhalg. 2000. Cross-hole Resistivity Tomography Using Different Electrode Configurations. *Geophysical Prospecting*. 48: 887-912.
- Zhou, Y.G., H. Yan dan Z. Fang. 2015. Design of an Electrical Capacitance Tomography System Based on LabVIEW. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*. 11(8): 165-178.

LAMPIRAN

Lampiran A. Dokumentasi penelitian

Desain arsitektur sistem ERT



Realisasi rangkaian alat ukur



Gelombang pulsa kotak menggunakan osiloskop



Lampiran B. Tabel hasil pengukuran rangkaian alat ukur berbasis Arduino

No.	Tegangan terukur		Error (%)	Akurasi (%)
	Arduino	AVO meter		
1	2,458	2,4	0,02	97,58
2	2,453	2,4	0,02	97,79
3	2,459	2,4	0,02	97,54
4	2,458	2,4	0,02	97,58
5	2,455	2,4	0,02	97,71
6	2,455	2,4	0,02	97,71
7	2,453	2,4	0,02	97,79
8	2,454	2,4	0,02	97,75
9	2,453	2,4	0,02	97,79
10	2,458	2,4	0,02	97,58
Rata-Rata				97,68

Lampiran C. Code metode beda hingga menggunakan aplikasi MatLab

```

clear all;clc;
%Inisialisasi(deklarasi variabel)
n = 19;
m = 19;
o = 38;
xmin = 1; xmax = 19;
ymin = 1; ymax = 19;
dx = (xmax - xmin)/(n - 1);
dy = (ymax - ymin)/(m - 1);
v = zeros(n,m);
vd = zeros(n,m);
x = xmin:dx:xmax;
y = ymin:dy:ymax;

%Proses FDM
for o = 1:o
    vd = v;
    for i = 2:n - 1
        for j = 2:m - 1
            %syarat batas
            v(10,2) = 0;
            v(10,18) = 5;

```

```
v(i,j) = (((vd(i + 1,j) + vd(i - 1,j)) * dy^2 + (vd(i,j - 1) + vd(i,j  
+ 1)) * dx^2)/(dx^2 + dy^2)/2);  
end  
end  
end  
  
%Visualisasi  
figure(1)  
contour(x,y,v,0:1:19)  
h = gca;  
get(h,'FontSize')  
set(h,'FontSize',12)  
colorbar('location','eastoutside','fontsize',12);  
axis([1 n 1 m])  
xlabel('j','fontSize',12);  
ylabel('i','fontSize',12);  
title('Distribusi Potensial Listrik V(i,j)','fontSize',12);  
fh = figure(1);  
set(fh,'color','white');
```


Lampiran E. Beda tegangan terukur pada keseluruhan *Base* pada saat simulasi

Rover	Tegangan												
	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	Base 5	Base 6	Base 7	Base 8	Base 9	Base 10	Base 11	Base 12	Base 13
1	0,000	-0,131	-0,178	-0,204	-0,562	-1,012	-5,000	-1,012	-0,562	-0,204	-0,178	-0,131	0,000
2	0,131	0,000	-0,047	-0,073	-0,431	-0,881	-4,869	-0,881	-0,431	-0,073	-0,047	0,000	0,131
3	0,178	0,047	0,000	-0,026	-0,384	-0,834	-4,822	-0,834	-0,384	-0,026	0,000	0,047	0,178
4	0,204	0,073	0,026	0,000	-0,357	-0,808	-4,796	-0,808	-0,357	0,000	0,026	0,073	0,204
5	0,562	0,431	0,384	0,357	0,000	-0,450	-4,438	-0,450	0,000	0,357	0,384	0,431	0,562
6	1,012	0,881	0,834	0,808	0,450	0,000	-3,988	0,000	0,450	0,808	0,834	0,881	1,012
7	5,000	4,869	4,822	4,796	4,438	3,988	0,000	3,988	4,438	4,796	4,822	4,869	5,000
8	1,012	0,881	0,834	0,808	0,450	0,000	-3,988	0,000	0,450	0,808	0,834	0,881	1,012
9	0,562	0,431	0,384	0,357	0,000	-0,450	-4,438	-0,450	0,000	0,357	0,384	0,431	0,562
10	0,204	0,073	0,026	0,000	-0,357	-0,808	-4,796	-0,808	-0,357	0,000	0,026	0,073	0,204
11	0,178	0,047	0,000	-0,026	-0,384	-0,834	-4,822	-0,834	-0,384	-0,026	0,000	0,047	0,178
12	0,131	0,000	-0,047	-0,073	-0,431	-0,881	-4,869	-0,881	-0,431	-0,073	-0,047	0,000	0,131
13	0,000	-0,131	-0,178	-0,204	-0,562	-1,012	-5,000	-1,012	-0,562	-0,204	-0,178	-0,131	0,000

**Lampiran F. Tabel hasil pengukuran menggunakan medium air pada saat
Base 1**

Perlakuan	Rover	Pengulangan										Presisi (%)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Tanpa Material	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
	2	2,722	2,717	2,722	2,717	2,722	2,727	2,727	2,727	2,727	2,717	2,717	99,868
	3	2,844	2,844	2,839	2,844	2,844	2,844	2,849	2,854	2,859	2,839	2,839	99,831
	4	2,903	2,893	2,898	2,888	2,893	2,903	2,898	2,908	2,922	2,893	2,893	99,749
	5	2,993	2,983	2,983	2,987	2,997	2,987	2,997	2,998	2,995	2,993	2,993	99,832
	6	3,079	3,079	3,069	3,074	3,074	3,084	3,084	3,084	3,088	3,069	3,069	99,821
	7	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	100,000
	8	3,035	3,040	3,044	3,040	3,040	3,044	3,044	3,044	3,044	3,030	3,030	99,885
	9	2,971	2,961	2,986	2,976	2,976	2,981	2,991	2,991	2,991	2,971	2,971	99,715
	10	2,898	2,883	2,908	2,898	2,903	2,898	2,903	2,903	2,917	2,893	2,893	99,779
	11	2,825	2,820	2,829	2,820	2,825	2,829	2,825	2,820	2,810	2,815	2,815	99,830
	12	2,688	2,683	2,688	2,688	2,683	2,707	2,693	2,697	2,702	2,688	2,688	99,761
		Rata-Rata										99,839	
Posisi 1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
	2	2,448	2,434	2,434	2,434	2,434	2,438	2,434	2,434	2,429	2,434	2,434	99,942
	3	2,693	2,683	2,668	2,668	2,673	2,668	2,673	2,683	2,658	2,668	2,668	99,880
	4	2,751	2,746	2,741	2,732	2,737	2,732	2,737	2,737	2,732	2,741	2,741	99,927
	5	2,839	2,829	2,820	2,815	2,820	2,815	2,820	2,829	2,805	2,820	2,820	99,907
	6	2,922	2,908	2,913	2,908	2,922	2,917	2,913	2,908	2,898	2,917	2,917	99,926
	7	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	100,000
	8	2,903	2,898	2,888	2,878	2,898	2,883	2,883	2,903	2,878	2,888	2,888	99,888
	9	2,820	2,805	2,785	2,790	2,805	2,800	2,805	2,810	2,795	2,805	2,805	99,892
	10	2,746	2,737	2,727	2,727	2,732	2,727	2,732	2,737	2,712	2,737	2,737	99,903
	11	2,663	2,668	2,644	2,644	2,649	2,639	2,649	2,649	2,644	2,653	2,653	99,894
	12	2,541	2,536	2,517	2,512	2,517	2,521	2,517	2,521	2,512	2,526	2,526	99,871
	13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
		Rata-Rata										99,925	
Posisi 2	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
	2	2,815	2,820	2,815	2,820	2,810	2,815	2,820	2,815	2,815	2,820	2,820	99,961
	3	3,064	3,069	3,064	3,084	3,069	3,064	3,064	3,059	3,074	3,079	3,079	99,929
	4	3,132	3,128	3,113	3,132	3,123	3,118	3,118	3,118	3,132	3,128	3,128	99,929
	5	3,191	3,186	3,186	3,196	3,181	3,176	3,167	3,172	3,181	3,181	3,181	99,929
	6	3,245	3,245	3,235	3,245	3,225	3,225	3,230	3,235	3,245	3,240	3,240	99,926
	7	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	100,000
	8	3,230	3,220	3,220	3,235	3,206	3,206	3,216	3,211	3,220	3,220	3,220	99,926
	9	3,176	3,172	3,162	3,191	3,162	3,157	3,162	3,157	3,181	3,172	3,172	99,898

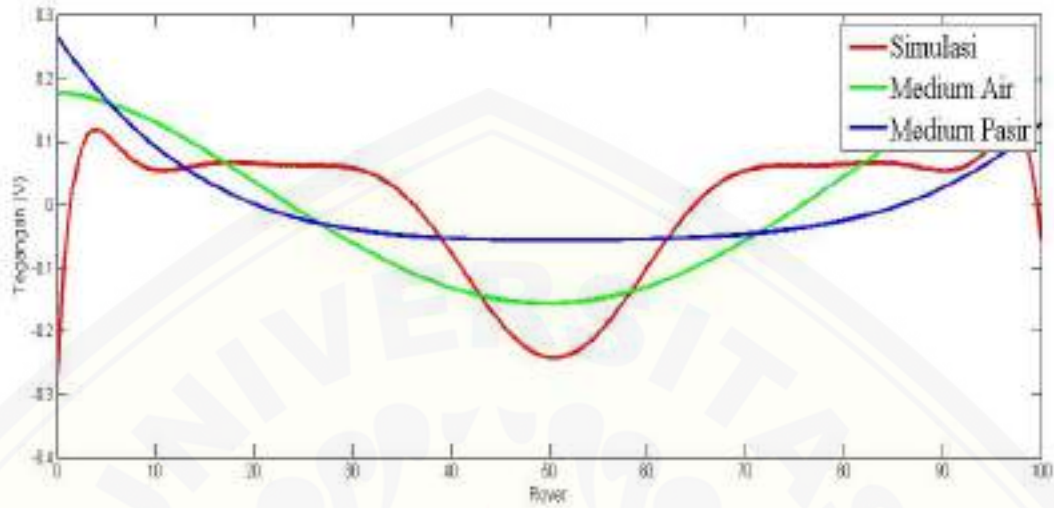
Perlakuan	Rover	Pengulangan										Presisi (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	10	3,137	3,118	3,132	3,132	3,123	3,128	3,118	3,113	3,132	3,113	99,914
	11	3,064	3,054	3,049	3,059	3,044	3,044	3,044	3,054	3,064	3,054	99,926
	12	2,888	2,883	2,883	2,893	2,878	2,878	2,883	2,883	2,893	2,883	99,945
	13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
		Rata-Rata										99,940
	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
	2	2,121	2,111	2,111	2,111	2,111	2,116	2,116	2,111	2,116	2,111	99,925
	3	2,292	2,287	2,306	2,287	2,282	2,292	2,277	2,287	2,287	2,292	99,888
	4	2,336	2,316	2,321	2,331	2,326	2,311	2,316	2,316	2,316	2,321	99,876
	5	2,390	2,385	2,380	2,380	2,380	2,380	2,375	2,380	2,370	2,385	99,927
	6	2,521	2,502	2,497	2,502	2,497	2,507	2,497	2,512	2,507	2,507	99,896
	7	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	100,000
Posisi 3	8	2,473	2,458	2,453	2,463	2,463	2,468	2,453	2,463	2,468	2,463	99,914
	9	2,385	2,365	2,360	2,365	2,360	2,375	2,365	2,370	2,365	2,350	99,873
	10	2,316	2,316	2,316	2,311	2,316	2,321	2,316	2,306	2,311	2,316	99,936
	11	2,282	2,272	2,267	2,258	2,258	2,272	2,267	2,262	2,267	2,267	99,895
	12	2,199	2,179	2,179	2,179	2,184	2,174	2,179	2,179	2,179	2,184	99,895
	13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
		Rata-Rata										99,919

Lampiran G. Tabel hasil pengukuran menggunakan medium pasir pada saat
Base 1

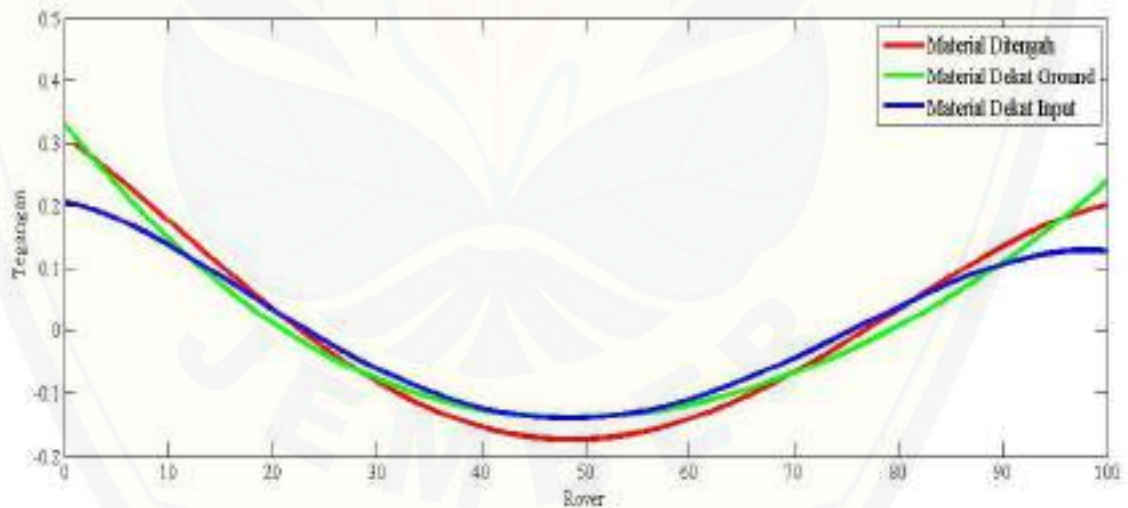
Perlakuan	Rover	Pengulangan										Presisi (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
	2	1,759	1,749	1,720	1,725	1,749	1,779	1,759	1,759	1,759	1,759	99,272
	3	1,984	1,989	1,930	1,940	1,989	2,003	1,964	1,964	1,974	1,974	99,123
	4	1,969	2,000	1,951	1,975	2,009	2,000	1,995	1,985	1,965	1,985	99,258
	5	2,000	1,911	2,004	2,010	2,030	1,991	1,997	1,994	1,986	1,984	99,085
	6	2,038	2,038	2,003	2,008	2,038	2,013	1,989	1,979	1,994	2,033	99,068
Tanpa Material	7	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	100,000
	8	2,043	2,047	2,013	2,023	2,072	2,018	1,994	2,008	1,994	2,052	98,930
	9	2,033	2,047	2,023	2,023	2,052	1,994	1,964	1,945	1,955	2,067	98,177
	10	1,994	2,008	2,003	1,994	2,023	1,974	1,945	1,920	1,955	2,023	98,573
	11	2,013	2,023	1,989	1,984	2,028	1,955	1,955	1,925	1,930	2,023	98,335
	12	1,901	1,911	1,886	1,891	1,935	1,842	1,818	1,808	1,818	1,891	97,921
	13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
		Rata-Rata										98,979

Perlakuan	Rover	Pengulangan										Presisi (%)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Posisi 1	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
	2	1,446	1,441	1,427	1,446	1,436	1,436	1,451	1,451	1,461	1,476	1,476	99,463
	3	1,485	1,495	1,480	1,480	1,480	1,476	1,495	1,500	1,500	1,515	1,515	99,480
	4	1,559	1,559	1,544	1,554	1,544	1,539	1,549	1,564	1,564	1,568	1,568	99,614
	5	1,593	1,612	1,593	1,598	1,593	1,593	1,588	1,603	1,612	1,617	1,617	99,625
	6	1,673	1,673	1,673	1,673	1,673	1,673	1,673	1,673	1,673	1,673	1,673	100,000
	7	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	100,000
	8	1,617	1,647	1,637	1,632	1,627	1,622	1,632	1,632	1,637	1,637	1,637	99,750
	9	1,524	1,534	1,524	1,534	1,529	1,524	1,520	1,539	1,554	1,549	1,549	99,579
	10	1,485	1,500	1,495	1,505	1,500	1,490	1,480	1,495	1,510	1,500	1,500	99,652
	11	1,461	1,490	1,485	1,485	1,480	1,456	1,471	1,480	1,485	1,476	1,476	99,556
	12	1,407	1,441	1,432	1,432	1,427	1,407	1,412	1,427	1,436	1,436	1,436	99,441
	13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
Rata-Rata											99,705		
Posisi 2	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
	2	2,160	1,999	2,028	2,018	2,121	2,062	2,199	2,126	2,170	2,194	2,194	98,380
	3	2,297	2,135	2,170	2,165	2,258	2,209	2,341	2,258	2,306	2,336	2,336	98,632
	4	2,331	2,170	2,204	2,194	2,297	2,233	2,365	2,292	2,350	2,365	2,365	98,635
	5	2,390	2,243	2,282	2,248	2,365	2,297	2,424	2,370	2,429	2,414	2,414	98,729
	6	2,653	2,526	2,575	2,551	2,634	2,585	2,678	2,649	2,688	2,678	2,678	99,192
	7	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	100,000
	8	2,478	2,321	2,375	2,350	2,453	2,399	2,526	2,443	2,492	2,512	2,512	98,896
	9	2,380	2,223	2,267	2,248	2,350	2,297	2,434	2,365	2,394	2,414	2,414	98,723
	10	2,360	2,204	2,262	2,233	2,336	2,272	2,409	2,346	2,380	2,385	2,385	98,744
	11	2,336	2,174	2,228	2,199	2,306	2,248	2,390	2,316	2,350	2,360	2,360	98,671
	12	2,155	1,989	1,989	2,028	2,130	2,082	2,179	2,028	2,170	2,179	2,179	98,232
Posisi 3	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000
	2	0,685	0,651	0,675	0,661	0,651	0,680	0,671	0,695	0,680	0,680	0,680	97,173
	3	0,752	0,718	0,742	0,728	0,718	0,747	0,738	0,762	0,747	0,747	0,747	97,662
	4	0,821	0,796	0,806	0,791	0,796	0,811	0,811	0,830	0,821	0,821	0,821	98,220
	5	0,830	0,791	0,801	0,806	0,791	0,821	0,811	0,835	0,826	0,816	0,816	97,847
	6	0,889	0,850	0,874	0,865	0,860	0,879	0,874	0,899	0,884	0,879	0,879	98,448
	7	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	100,000
	8	0,850	0,830	0,835	0,835	0,830	0,855	0,845	0,874	0,855	0,850	0,850	98,307
	9	0,840	0,816	0,826	0,821	0,821	0,840	0,830	0,865	0,845	0,840	0,840	98,149
	10	0,791	0,777	0,786	0,777	0,782	0,806	0,791	0,821	0,806	0,801	0,801	97,926
	11	0,782	0,747	0,772	0,816	0,752	0,782	0,767	0,830	0,796	0,767	0,767	96,340
	12	0,689	0,659	0,684	0,694	0,654	0,684	0,674	0,718	0,708	0,674	0,674	96,474

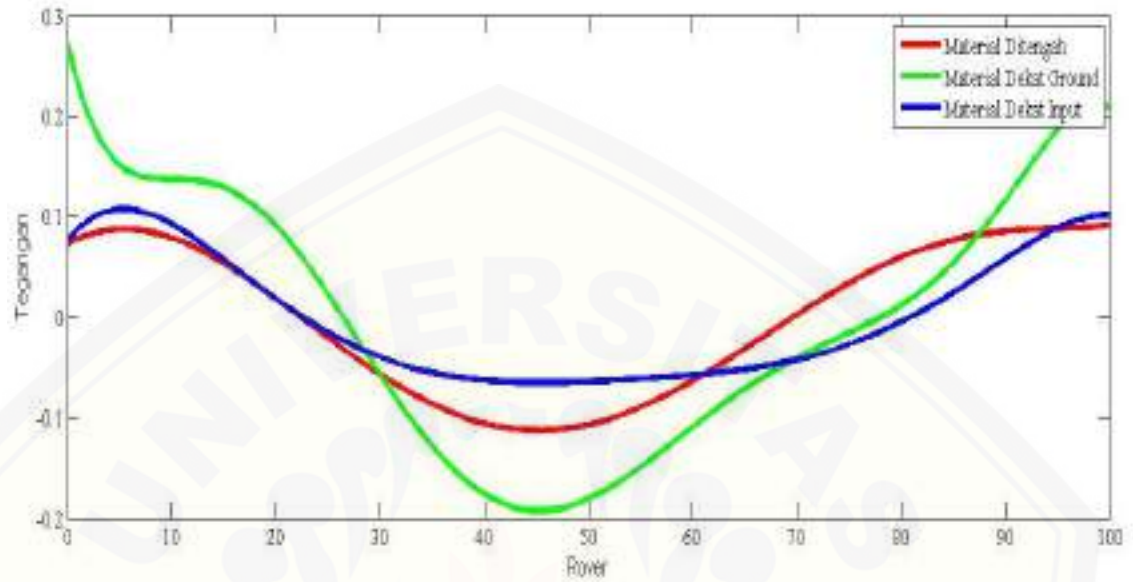
Lampiran H. Pola beda tegangan yang didapat pada simulasi, medium air dan medium pasir secara homogen



Lampiran I. Pola beda tegangan yang didapat pada medium air secara heterogen

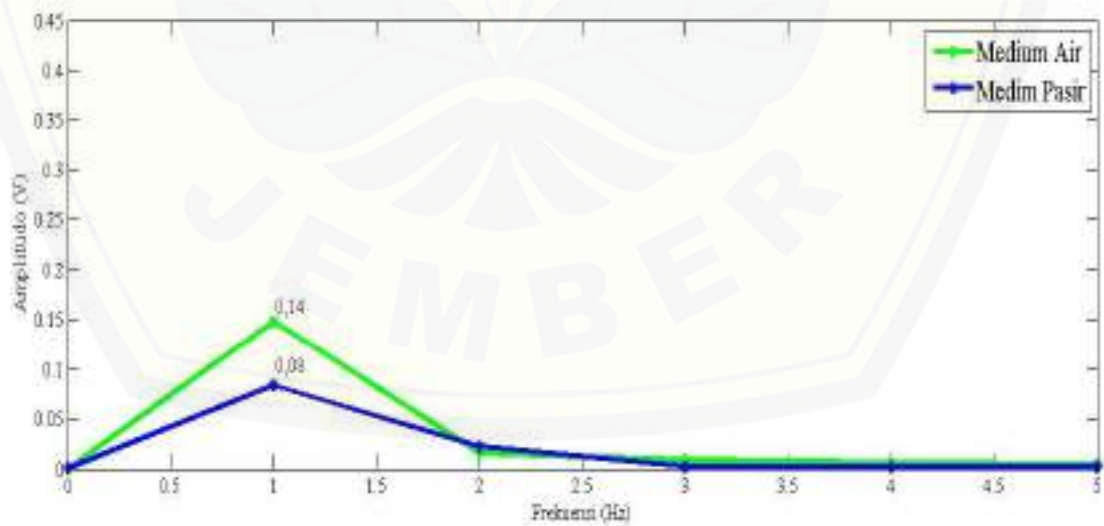


Lampiran J. Pola beda tegangan yang didapat pada medium pasir secara heterogen

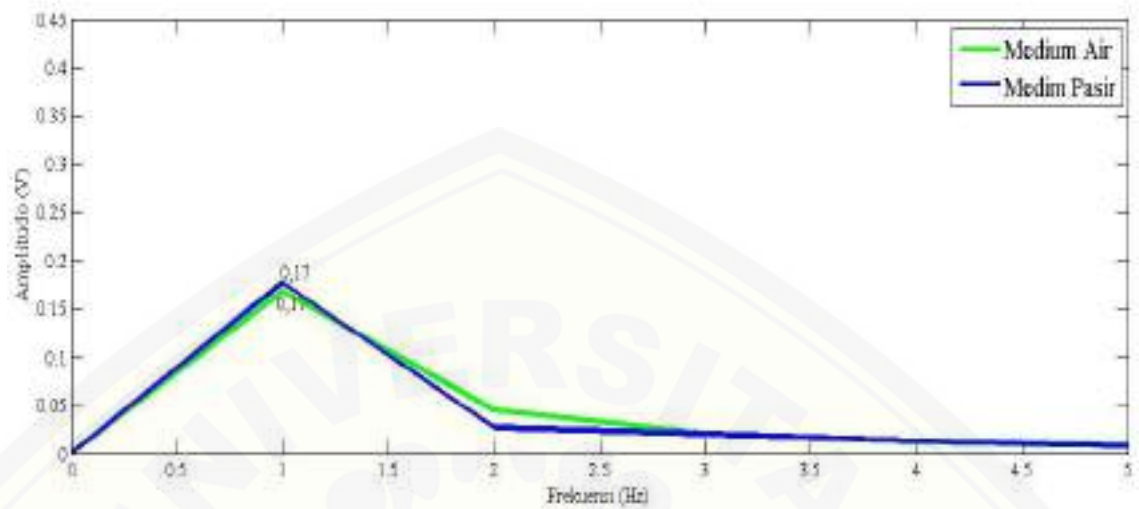


Lampiran K. Hasil FFT perbandingan medium air dan medium pasir secara heterogen

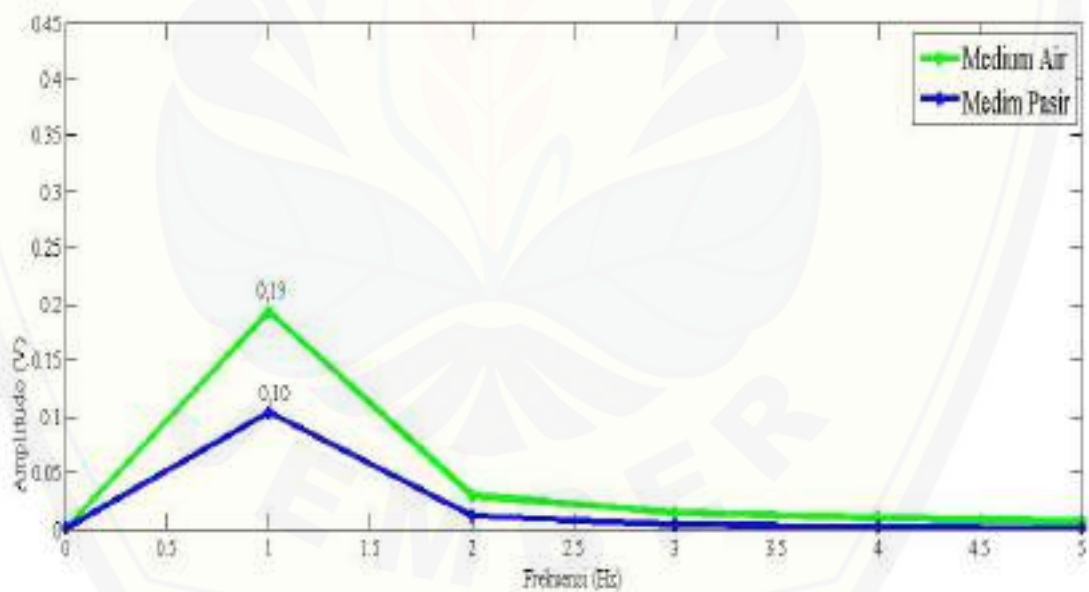
Material berada ditengah



Material berada dekat dengan *Ground*



Material berada dekat dengan *Input*



Lampiran L. Tabel Resistivitas Bahan

Material	Resistivitas (Ωm)
Udara	~
Pirit	0,01 – 100
Kwarsa	500 – 800000
Kalsit	1×10^{12} – 1×10^{13}
Garam Batu	30 – 1×10^{13}
Granit	200 – 100000
Andesit	$1,7 \times 10^2$ – 45×10^4
Basal	200 – 100000
Gamping	500 – 10000
Batu Pasir	200 – 8000
Batu Tulis	20 – 2000
Pasir	1 – 1000
Air Tanah	0,5 – 300
Air Asin	0,2
Magnetit	0,01 – 1000
Kerikil Kering	600 – 10000
Aluvium	10 – 800
Kerikil	100 – 600

Sumber: Terlford dkk (1990)

Lampiran M. *Countour Fill* Dristribusi Tegangan Simulasi dengan Metode Bada Hingga

