

**MENGIDENTIFIKASI DUGAAN SISA STRUKTUR BANGUNAN TUA  
BENTENG SOMBA OPU MENGGUNAKAN METODE GPR (*GROUND  
PENETRATING RADAR*)**



**GLORIA VIRGYAN**

**H061 20 1054**



**PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2024**

**MENGIDENTIFIKASI DUGAAN SISA STRUKTUR BANGUNAN DARI  
KERAJAAN TUA BENTENG SOMBA OPU MENGGUNAKAN METODE GPR  
(GROUND PENETRATING RADAR)**



**GLORIA VIRGYAN**

**H061 20 1054**



**PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2024**

**MENGIDENTIFIKASI DUGAAN SISA STRUKTUR BANGUNAN DARI  
KERAJAAN TUA BENTENG SOMBA OPU MENGGUNAKAN METODE GPR  
(*GROUND PENETRATING RADAR*)**

**GLORIA VIRGYAN  
H0161201054**



**PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**MENGIDENTIFIKASI DUGAAN SISA STRUKTUR BANGUNAN DARI KERAJAAN  
TUA BENTENG SOMBA OPU MENGGUNAKAN METODE GPR  
(*GROUND PENETRATING RADAR*)**

**GLORIA VIRGYAN  
H0161201054**

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Geofisika

pada

**PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**SKRIPSI**

**MENGIDENTIFIKASI DUGAAN SISA STRUKTUR BANGUNAN DARI KERAJAAN  
TUA BENTENG SOMBA OPU MENGGUNAKAN METODE GPR (GROUND  
PENETRATING RADAR)**

**GLORIA VIRGYAN**

**H0161201054**

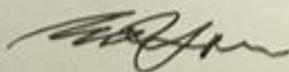
Skripsi,

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Geofisika pada Tanggal 31  
Oktober 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan  
pada

Program Studi Geofisika  
Departemen Geofisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Hasanuddin  
Makassar  
2024

Mengesahkan:  
Pembimbing tugas akhir,



Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si.  
NIP. 196709032001121001

Mengetahui:  
Ketua Departemen,



Dr. Muh. Alimuddin Hamzah Assegaf, M.Eng.  
NIP. 19709291993031003

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "Mengidentifikasi Dugaan Sisa Struktur Bangunan Benteng Somba Opu Menggunakan Metode GPR (*Ground Penetrating Radar*)" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing bapak Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si. sebagai Pembimbing Utama. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 2 Desember 2024



H061201054

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas kasih dan pertolongan-Nya yang senantiasa menyertai dan menuntun penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul " Mengidentifikasi Dugaan Sisa Struktur Bangunan dari Kerajaan tua Benteng Somba Opu menggunakan Metode Ground Penetrating Radar" sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua terkasih yang selalu mendoakan, mendukung, dan memberikan cinta kasihnya dengan tulus ikhlas. Begitu pula kepada adik penulis, Syalomita novrini yang selalu memberikan keceriaan dan semangat dalam proses penyusunan skripsi ini. Kehadiran mereka memberikan warna tersendiri dan menjadi sumber inspirasi bagi penulis untuk terus berjuang dan menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih juga untuk seluruh keluarga besar di mana pun berada untuk cinta dan dukungan yang selalu diberikan bagi penulis.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini tidak akan berjalan dengan baik tanpa adanya bantuan, dukungan, dorongan, bimbingan, motivasi serta nasehat dari berbagai pihak. Oleh sebab itu dengan penuh kerendahan hati penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin
2. Bapak Dr. Eng. Amiruddin, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Drs. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng., selaku Ketua Departemen Geofisika Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Drs. Erfan, M.Si., selaku pembimbing tugas akhir dan pembimbing akademik yang dengan penuh kesabaran telah membimbing penulis selama perkuliahan serta bersedia meluangkan waktu dan pemikiran untuk mendampingi penulis dalam penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Syamsyuddin, S.Si., M.Si, dan bapak Andi Muhammad Pramatadie, ST, M.Eng, Ph.D. selaku penguji yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan saran dalam penyempurnaan penyusunan skripsi ini.

6. Bapak/Ibu Dosen yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan bantuan selama masa perkuliahan
7. Staff Departemen Geofisika Pak Anto dan Pak Putra yang telah memberikan bantuan
8. Bapak Iswadi dari BPCB yang sudah membantu saya agar bisa mengambil data di Benteng somba opu
9. Terimakasih kepada partner saya Idzhar Ikhtiar Tahir yang sudah sangat membantu saya dalam penulisan skripsi dan pengambilan data untuk penelitian ini
10. Teman - teman Geofisika 2020 atas segala dukungan, kerja sama, dan kebersamaannya selama ini.
11. Sahabat- Sahabat saya yang sudah membantu dan mendukung saya Dalam penelitian dan pembuatan skripsi saya Inri Piter dan jessica Ratu Sa'pang
12. Terimakasih kepada kakak saya Dwi Hermansyah Ady yang sudah membantu,mendukung dari awal penulisan skripsi ini hingga selesai
13. Kepada adik-adik Febby, Upi,Haslinda,Azizah,Shane,Caca, Wilson yang sudah membantu dalam pengambilan data di Benteng Somba Opu
14. Kepada teman saya Sitti Mustaqima M Shaleh yang sudah membantu saya dari awal mencari judul untuk skripsi hingga selesai

## ABSTRAK

Gloria Virgyan . **Mengidentifikasi Dugaan Sisa Struktur Bangunan dari Kerajaan tua Benteng Somba Opu menggunakan Metode Ground Penetrating Radar** (dibimbing oleh Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si)

Pengukuran data dibawah permukaan di kawasan Benteng Somba Opu menggunakan *Software Ground Penetrating Radar* (GPR) bertujuan untuk menyediakan data persebaran indikasi objek arkeologi yang masih terpendam di bawah permukaan tanpa melakukan proses ekskavasi, sebagaimana bisa dilakukan dalam rekonstruksi arkeologi secara konvensional.

Pengukuran data GPR sebanyak 14 lintasan berada di Selatan bangunan Benteng Somba Opu yang terbagi menjadi 10 lintasan berorientasi utara-selatan dan 4 lintasan yang berorientasi timur-barat. Penelitian ini menggunakan Geopro 10 dengan antenna frekuensi 200 MHz. data radargram GPR telah di proses dengan menggunakan *software Geoproprojector*.

Hasil interpretasi penampang radargram berdasarkan analisa pada lokasi 2 didapatkan hasil dengan warna merah yang dimana semakin merah warnanya maka nilai amplitudanya semakin tinggi. Nilai amplitude tinggi ini diduga adalah objek arkeologi berupa bata sisa dari struktur benteng Somba Opu. Objek dari bata ini terdapat pada kedalaman 0.30-3 meter dibawah permukaan dengan nilai permitivitas ( $\epsilon_r = 5,5-5,7$ ).

Kata Kunci : Situs Arkeologi Benteng Somba Opu, Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR), arkeologi, identifikasi struktur.

## ABSTRACT

Gloria Virgyan. **Identifying the Remains of Building Structure of the Old Kingdom of Somba Opu Fort using Ground Penetrating Radar Method** (supervised by Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si)

The measurement of subsurface data in the Somba Opu Fort area using Ground Penetrating Radar (GPR) software aims to provide data on the distribution of indications of archaeological objects that are still buried below the surface without carrying out the excavation process, as can be done in conventional archaeological reconstruction.

GPR data measurement of 14 trajectories in the south of the Somba Opu Fort building is divided into 10 north-south oriented trajectories and 4 east-west oriented trajectories. This research uses Geopro 10 with 200 MHz frequency antenna. GPR radargram data has been processed using Geoprojector software.

The results of the interpretation of the radargram cross section based on the analysis at Location 2 obtained results with a bright red color where the brighter the color, the higher the amplitude value. This high amplitude value is thought to be an archaeological object in the form of bricks left over from the Somba Opu fort structure. The object of this brick is found at a depth of 0.30-3 meters below the surface below the surface with a permittivity value ( $\epsilon_r = 5.5-5.7$ ).

Keywords: Somba Opu Fort Archaeological Site, Ground Penetrating Radar (GPR) Method, archaeology, structure identification

## DAFTAR ISI

<b>SKRIPSI</b> .....	v
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	vi
<b>ABSTRAK</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>BAB I</b> .....	1
<b>PENDAHULUAN</b> .....	1
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Tujuan dan Manfaat .....	2
I.2.1 Tujuan.....	2
I.2.2 Manfaat.....	2
I.3 Landasan Teori.....	3
I.3.1 Benteng Somba Opu.....	3
I.3.2 Tujuan di Bangunnya Benteng Somba Opu .....	5
I.3.3 Gelombang Elektromagnetik .....	8
I.3.4 Prinsip Dasar Metode GPR.....	10
I.3.5 Persamaan Dasar Metode GPR ( <i>Ground Penetrating Radar</i> ) .....	14
I.3.6 Permittivitas Dielektrik dan Konduktivitas .....	15
I.3.7 Resolusi Horizontal.....	16
I.3.8 Metode GPR untuk Identifikasi Situs Arkeologi Terpendam .....	16
<b>BAB II METODE PENELITIAN</b> .....	18
II.1 Lokasi Penelitian .....	18
II.2 Alat dan Bahan.....	21
II.2.1 Alat .....	21
II.2.2 Bahan .....	21
II.3 Prosedur Penelitian.....	21
II.3.1 Tahap Pengambilan data.....	21
II.3.2 Tahap Pengolahan Data .....	21
II.4 Bagan Alir.....	28
<b>BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	29

III.1 Hasil .....	29
<b>BAB IV PEMBAHASAN</b> .....	45
IV.1 Data Penelitian .....	45
IV.2 Hasil Pengolahan data GPR .....	45
IV.3 Hasil Interpretasi dari masing-masing <i>Line</i> .....	45
<b>BAB V KESIMPULAN</b> .....	50
V.1 KESIMPULAN .....	50
V.2 SARAN .....	51
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	52

**DAFTAR TABEL**

<b>Tabel 1</b> Resolusi dan daya tembus gelombang radar.....	10
<b>Tabel 2</b> Nilai parameter fisis dari beberapa material (Geopro 10 Ground Penetrating Radar Manual).....	13

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b> Lukisan Peta Benteng Somba Opu pada atlas Blaeu-Van der Hem 1665.....	4
<b>Gambar 2</b> Spektrum Gelombang Elektromagnetik (Bahri, 2009).....	9
<b>Gambar 3.</b> Akuisi Data GPR (Astutik, 1997) .....	11
<b>Gambar 4.</b> Prinsip Resolusi horizontal Dalam Metode GPR.....	16
<b>Gambar 5.</b> Peta Zonasi Benteng Somba Opu (Sumber : Zonasi Benteng Somba Opu, 2011) .....	18
<b>Gambar 6.</b> Sketsa Lintasan Pengukuran GPR Zona 1 dan Line Pembanding .....	19
<b>Gambar 7.</b> Sketsa Lintasan Pengukuran GPR Zona 2 .....	20
<b>Gambar 8.</b> Menjalankan perangkat lunak <i>GeoProProjector</i> .....	22
<b>Gambar 9.</b> Membuat <i>working directory</i> .....	22
<b>Gambar 10</b> Memasukkan data hasil pengukuran .....	23
<b>Gambar 11.</b> prosesing data dengan menerapkan filter <i>dewow</i> .....	24
<b>Gambar 12.</b> Melakukan <i>Gain Adjust</i> .....	24
<b>Gambar 13.</b> Melakukan <i>Digital filter</i> .....	25
<b>Gambar 14.</b> Melakukan <i>Background Remove</i> .....	26
<b>Gambar 15.</b> Melakukan <i>moving average</i> .....	26
<b>Gambar 16</b> Estimasi posisi target .....	27
<b>Gambar 17.</b> Bagan Alir .....	28
<b>Gambar 18</b> Warna Amplitudo .....	29
<b>Gambar 19.</b> Hasil analisis pada lintasan <i>testrun</i> sebagai lintasan pembanding.....	30
<b>Gambar 20.</b> Interpretasi hasil pada <i>line A'</i> Lokasi 1 .....	31
<b>Gambar 21.</b> Hasil Interpretasi Pada <i>Line B'</i> Lokasi 1.....	32
<b>Gambar 22.</b> Hasil Interpretasi pada <i>line C'</i> lokasi 1 .....	32
<b>Gambar 23.</b> Hasil interpretasi pada <i>line 1</i> lokasi 2.....	33
<b>Gambar 24.</b> Hasil Interpretasi pada <i>line 2</i> lokasi 2 .....	34
<b>Gambar 25.</b> Hasil Interpretasi pada <i>line 3</i> Lokasi 2 .....	35

<b>Gambar 26.</b> Hasil interpretasi pada <i>line</i> 4 lokasi 2.....	37
<b>Gambar 27.</b> Hasil Interpretasi pada <i>line</i> 5 lokasi 2 .....	38
<b>Gambar 28.</b> Hasil interpretasi pada <i>line</i> 6 lokasi 2.....	39
<b>Gambar 29.</b> Hasil interpretasi pada <i>line</i> 7 lokasi 2.....	40
<b>Gambar 30.</b> Hasil interpretasi pada <i>line</i> 8 lokasi 2.....	41
<b>Gambar 31.</b> Hasil interpretasi pada <i>line</i> 9 lokasi 2.....	42
<b>Gambar 32.</b> Hasil interpretasi pada <i>line</i> 10 lokasi.....	43

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **I.1 Latar Belakang**

Bangsa Indonesia terkenal sebagai suatu bangsa yang memiliki kekayaan seni budaya yang bernilai tinggi. Warisan budaya nasional itu ada yang berupa bangunan atau monumen, kesenian, naskah-naskah kuno dan jenis-jenis budaya lainnya (Sumarsih, 1985). Perjalanan panjang Negara Indonesia masa kolonialisme hingga kemerdekaan, meninggalkan berbagai bukti yang masih dapat disaksikan sampai saat ini, baik fisik maupun non fisik. Peninggalan non fisik bisa diartikan peninggalan budaya, agama atau pun makanan, sementara peninggalan fisik dapat berupa bangunan atau benda bersejarah yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Bangunan dan benda bersejarah memiliki nilai ekonomis jika pemerintah dan pihak terkait mampu mengelola sebagai destinasi wisata. Cagar budaya juga dapat digunakan sebagai sumber belajar sejarah yang banyak bermanfaat dalam pembelajaran sekaligus memperkenalkan kepada peserta didik mengenai perjalanan perjuangan bangsa. Salah satu peninggalan fisik yaitu Benteng Somba Opu (Kerajaan Tua).

Salah satu saksi bisu sejarah kerajaan di Indonesia yaitu Benteng Somba Opu yang merupakan peninggalan sejarah Kerajaan Gowa. Letak Benteng di jalan Daeng Tata, Kelurahan Benteng Somba Opu, kecamatan Barombong, kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Waktu berdirinya kerajaan Gowa belum diketahui dengan pasti, lontara-lontara di Gowa menjelaskan bahwa sebelumnya Kerajaan Gowa dipimpin oleh putri yang disebut "Tumanurung" dan awal berdirinya Kerajaan Gowa hanya dijelaskan dengan ringkas. Dari awal terbentuknya Kerajaan Gowa sampai pada masa pemerintahan raja Gowa ke VIII tidak nampak kemajuan yang berarti. Pada masa kekuasaan raja Gowa ke IX Daeng Matanre Karaeng Manuntungi Tumapa'risi Kallonna barulah berita tentang tumbuhnya kerajaan Gowa tersebar keluar daerah Sulawesi pada abad ke-16. Raja Gowa Daeng Matanre Karaeng Manuntungi Tumapa'risi Kallonna memerintahkan untuk memindahkan ibu kota kerajaan dari daerah Tamalate ke daerah Somba Opu dan menetapkan Somba Opu sebagai ibu kota dan pusat kegiatan administrasi pemerintahan dan perekonomian kerajaan Gowa. Bagi suatu kerajaan, Benteng digunakan sebagai simbol kekuasaan atau pertahanan. Semakin banyak Benteng pertahanan, berarti kerajaan tersebut mengalami kemakmuran dan kejayaan. Benteng pertahanan tersebut dibangun oleh rakyat pribumi atas perintah raja yang berkuasa di suatu kerajaan. Sama halnya dengan kerajaan Gowa yang mendirikan

banyak Benteng untuk pertahanan kota. Menurut para sumber Benteng yang besar dan terkuat diantara Benteng-Benteng kerajaan Gowa adalah Benteng Somba Opu (Rarukan, D. S., 2021).

Berdasarkan hasil diskusi dengan pihak cagar budaya, di daerah Kerajaan Tua ada struktur bangunan yang kemungkinan masih terkubur, untuk struktur bangunan yang sudah di teliti menggunakan metode eskavasi diperoleh hasil berupa sisa struktur bangunan yang terkubur dengan kedalaman kurang lebih 3meter dibawah permukaan. sedangkan untuk beberapa lokasi yang belum dilakukan ekskavasi diduga adanya peninggalan dari struktur bangunan Benteng somba opu, di perkirakan di beberapa daerah yang dijadikan tempat penelitian tersebut masih terdapat sisa-sisa peninggalan dari struktur bangunan dan untuk mendeteksi ada atau tidaknya peninggalan tersebut maka dilakukan penelitian menggunakan metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) untuk mendeteksi ada atau tidaknya peninggalan situs purbakala yang masih terkubur maka diperlukan metode dan alat ukur yang dapat mengukur parameter-parameter fisis yang berhubungan dengan keberadaan benda-benda peninggalan situs purbakala tersebut. Metode yang digunakan untuk mendeteksi peninggalan situs purbakala tersebut dengan menggunakan Metode GPR.

Keunggulan dalam menggunakan metode georadar adalah dalam hal keakurasian data yang didapat. Metode georadar telah menggunakan teknologi alat yang lebih canggih sehingga keakurasian data yang di dapat jauh lebih baik dibandingkan dengan metode geofisika yang lain. Cara pengoprasian di lapangan juga lebih efisien dan mudah karena frekuensi yang digunakan sangat tinggi (MHz) maka resolusi yang diperoleh sangat tinggi, metode ini bersifat *non-destructive* (Tidak Merusak) sehingga cocok untuk melakukan penelitian seperti mengidentifikasi sisa-sisa bangunan di bawah permukaan tanpa merusak struktur dari bangunan tersebut.

## **I.2 Tujuan dan Manfaat**

### **I.2.1 Tujuan**

1. Mengetahui hasil dari GPR dalam kasus mengidentifikasi struktur sisa bangunan Benteng Somba Opu.
2. Mengetahui hubungan antara kecepatan gelombang elektromagnetik dan konstanta dielektrik (permitivitas Listrik Relative)

### **I.2.2 Manfaat**

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan informasi tentang sebaran objek dari struktur bangunan Benteng Somba Opu, beserta kedalaman permukaan objek yang

dapat digunakan sebagai dasar penelitian arkeologi lebih lanjut di area tersebut, serta memudahkan ekskavasi yang non-invasif terhadap objek arkelogi tersebut.

### **I.3 Landasan Teori**

#### **I.3.1 Benteng Somba Opu**

Benteng Somba Opu merupakan warisan budaya asli Makassar yang eksistensinya masih dapat dilihat hingga saat ini. Kerajaan Gowa-Tallo memiliki sejarah yang panjang mulai dimana kerajaan yang dulunya satu kemudian dibagi menjadi dua atas dasar pembagian kekuasaan kepada penerus kerajaan dan kemudian bersatu lagi dalam Kerajaan Gowa-Tallo. Benteng ini merupakan salah satu dari beberapa Benteng Kerajaan Gowa-Tallo yang berjumlah 11 Benteng yang dibangun dalam lima fase yang dimulai pada abad ke-16 pada pemerintahan Raja Gowa IX Daeng Matanre Karaeng Tumapa'risi' kallionna (1511-1547).

Di samping Benteng Somba Opu terdapat Benteng pertahanan yang bertebaran di wilayah kawasan inti Kerajaan Gowa antara lain: Benteng Tallo, Benteng Ana Tallo, Benteng Ujung Tana, Benteng Patunuang, Benteng Ujung Pandang, Benteng Bariboso, Benteng Mariso, Benteng Pannakukang, Benteng Garassi, Benteng Galesong, Benteng Sanrobone, Benteng Barombong, Benteng Bontorannu, dan Benteng Kale Gowa (M.D., 2012). Di antara sekian banyak Benteng kerajaan Gowa tersebut, yang terbesar dan terkuat adalah Benteng Somba Opu dimana Benteng ini merupakan tempat kediaman Raja Gowa. Benteng Somba Opu terletak tengah dua muara sungai yaitu Sungai Jeneberang dan Sungai Ballangberu yang dahulu kala berada tepat di tepi Pantai Makassar, bisa dilihat pada gambar 1 Lukisan Peta Benteng Somba Opu pada atlas Blaeu-Van der Hem 1665 (Sudawarni, 2020).



**Gambar 1.** Lukisan Peta Benteng Somba Opu pada atlas Blaeu-Van der Hem 1665

Pada bulan Juni 1669, setelah berbulan-bulan pertempuran sengit antara pasukan Makassar dan Bugis-Belanda, tentara Belanda berhasil menambang dan meledakkan celah 20 meter (65 kaki) di dinding Somba Opu setebal 3 meter yang telah didirikan orang Makassar. Keesokan harinya, terjadi pertempuran besar, Belanda menembakkan 30.000 peluru. Pasukan Belanda dan Bugis, banyak yang terserang penyakit disentri dan penyakit tropis lainnya. Tidak sampai sembilan hari setelah serangan itu banyak orang Makassar yang telah ditangkap. Somba Opu berada dalam kekuasaan Belanda, dan kerajaan Makassar yang perkasa hancur. Sejak Juli 1989, tim arkeolog Indonesia telah bekerja untuk melestarikan dan melindungi situs bersejarah ini. Pemulihan telah dipandu oleh dua peta. Salah satunya adalah peta Belanda Makassar tanggal 1638, ditemukan baru-baru ini di perpustakaan Eropa. Yang lainnya adalah peta abad ke-18 yang ditulis dalam aksara Makassar oleh seorang penulis yang tidak dikenal, menunjukkan tata kota dan rencana istana kerajaan. Penggalian telah menghasilkan banyak kejutan, termasuk ruang kosong yang dibangun pada dinding dengan jarak 8-10 meter (26-33 kaki). Alasan dibangunnya ruang-ruang ini kurang jelas tetapi yang pasti mengurangi kekuatan pertahanan dinding. Banyak dari mereka telah menemukan peralatan memasak yang menunjukkan pendudukan oleh pasukan Belanda. Temuan lain termasuk bola meriam batu, batu bata dengan gambar perahu dan desain geometris yang terukir di atasnya. Temuan lainnya berupa jalur jejak kucing dan cakar anjing yang cukup dalam, menunjukkan bahwa hewan dikorbankan sebagai bagian dari proses pembangunan.

Mungkin penemuan yang paling menarik adalah batu bata yang menunjukkan tulisan yang 8 tidak diketahui, mungkin versi sebelumnya dari tulisan Makassar lama yang sebelumnya digunakan di istana sebelum abad ke-18.

Istana dan rumah Somba Opu dilindungi oleh dinding bata tunggal, kecuali yang berbatasan dengan saluran utama Sungai Jeneberang. Di sini, dindingnya memiliki ketebalan tiga lapis: tembok tengah yang kuat terbuat dari batu bata besar dan dua dinding luar yang lebih ringan. Di antara, dinding-dinding itu penuh dengan tanah sebagai pertahanan suara melawan tembakan meriam. Batu bata dari tembok utara ini juga disemen. Benteng Somba Opu merupakan sebuah kota-kerajaan yang diperkuat dengan sebuah Benteng. Seperti sebuah Benteng pada umumnya, Benteng Somba Opu memiliki dinding yang berfungsi sebagai pelindung ataupun pemisah bagian dalam Benteng. Pada umumnya, sebutan Benteng digunakan untuk menyebut dinding dan daerah di dalamnya. Namun, dalam tulisan ini, sebutan Benteng pada Benteng Somba Opu lebih tepat diartikan sebagai suatu kawasan yang meliputi baik kota-kerajaan yang berada di dalam dinding maupun pemukiman pendukung yang berada di sisi luar dinding Benteng (Sudawarni, 2020).

### **1.3.2 Tujuan di Bangunnya Benteng Somba Opu**

Di antara sekian banyak Benteng kerajaan Gowa tersebut, yang terbesar dan terkuat adalah Benteng Somba Opu dimana Benteng ini merupakan tempat kediaman Raja Gowa. Benteng Somba Opu terletak tengah dua muara sungai yaitu Sungai Jeneberang dan Sungai Ballangberu dan dahulu kala berada tepat di tepi Pantai Makassar. Benteng Somba Opu dibangun dalam lima fase, yaitu:

- 1) Fase Pertama, dimulai pada abad XIV pada masa pemerintahan Raja Gowa IX Daeng Matanre Karaeng Tumapa'risi'Kallonna (1511-1547) pembangunan tembok dari tanah liat mengelilingi Kota Somba Opu;
- 2) Fase Kedua, masa pemerintahan Raha Karaeng Tunipallanga Ulaweng (1547-1565) melakukan perkuatan struktur dinding Benteng dengan bata dan pendirian dewala serta persenjataan meriam;
- 3) Fase Ketiga, masa pemerintahan Raja Gowa XII Karaeng Tunijallo (1565-1590) memperkuat dinding bata mengelilingi Kota Somba Opu dan menambahkan sejumlah meriam;

4) Fase Keempat, masa pemerintahan Raja Gowa XIV Sultan Alaudin (1593-1639) dengan memperkuat Benteng dengan puluhan meriam

5) Fase Lima, pada masa pemerintahan Sultan Hasanuddin sebagai Raja Gowa XVI (1653-1670) dengan melakukan banyak penyempurnaan dan memperkuat di bagian luar Benteng ini (Bullbeck, 1992).

Pada abad ke-16 Benteng Somba Opu merupakan salah satu pelabuhan yang ramai dan sangat penting dalam perdagangan dunia. Kemunculan kekuatan baru di Asia Tenggara yaitu kerajaan Gowa dengan ibukotanya Somba Opu yang berkembang menjadi bandar besar. Hal ini didukung dengan jatuhnya Malaka ke tangan Portugis tahun 1511 sehingga para pedagang mengalihkan jalur mereka ke ibu kota Somba Opu (Sumantri dkk, 2004). Pada waktu itu Benteng Somba Opu memberikan fasilitas perbekalan bagi kapal-kapal yang hendak berlayar ke timur maupun ke barat. Rempah-rempah yang dapat diperoleh di pelabuhan Somba Opu kadang-kadang lebih murah daripada di Maluku sendiri. Peranan dan posisi Somba Opu sebagai bandar semakin meningkat pada abad ke-17 (Abduh dkk, 1985). Kemajuan Makassar sebagai salah satu kota dagang dunia adalah pada masa pemerintahan Sultan Malikussaid (Raja Gowa XV) dan Mangkubumi I Mandacinna Daeng Sitaba Karaeng Patingalloang (1639-1654). Pada masa pemerintahan beliau, Kerajaan GowaTallo menjadi sebuah kerajaan terkenal dan banyak mengundang perhatian negeri lain untuk datang ke Makassar. Makassar telah berkedudukan sebagai:

- 1) pusat perniagaan dari pedagang dan pelaut Makassar dan pangkalan bagi persebaran pelayanan niaga mereka;
- 2) pelabuhan transito terpenting dari komoditas rempah-rempah dan kayu cendana;
- 3) daerah yang berkelimpahan produksi pangan (beras dan ternak);
- 4) Bandar Niaga Internasional; dan
- 5) Pemerintah sangat baik dan toleransi. Dari kelima hal tersebut tercipta hubungan harmonis antara berbagai pihak dalam kegiatan perdagangan dan kehidupan sosial keagamaan.

Pada 1625, sebanyak 22 kapal Portugis mengunjungi pelabuhan setiap tahun. Inggris mendirikan pabrik di Makassar pada 1613, Denmark pada 1618; Pedagang Spanyol dan Cina mulai muncul pada 1615. Pabrik asing itu berlokasi di utara Sombaopu, di tepi

seberang Sungai Jenebereng. Makassar terkenal sebagai kerajaan di mata orang asing. Terlepas dari kenyataan bahwa itu adalah negara Islam, ada tempat-tempat ibadah Kristen dan kota ini adalah rumah bagi sejumlah pengunjung terkemuka. Ketika Makassar menjadi kota dunia, Sultan Malikussaid (Raja Gowa XV) banyak mengizinkan negara lain untuk membuka loji di Somba Opu dan banyak menjalin persahabatan dengan Negaranegara lain di dunia seperti Raja Inggris, Raja Kastilia di Spanyol, Raja Portugis di Lisabon, Raja Muda Portugis di Goa (India), Gubernur Spanyol dan Manchente di Mesoliputan (India), Mufti besar Arab Saudi, dan beberapa kerajaan di nusantara.(Sudawarni, 2020).

### **1.3.2.1 Jatuhnya Benteng Somba Opu**

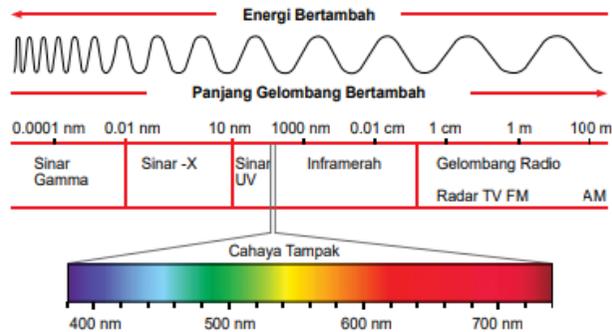
Pada tanggal 15 Juni 1669, setelah berbulan-bulan terjadi pertempuran sengit antara pasukan Makassar dan BugisBelanda, tentara Belanda berhasil meledakkan celah 20 meter (65 kaki) di dinding Somba Opu setebal 3meter yang telah didirikan orang Makassar. Keesokan harinya, terjadi pertempuran besar, Belanda menembakkan 30.000 peluru. Pasukan Belanda dan Bugis, banyak yang terserang penyakit disentri dan penyakit tropis lainnya. Para pejuang Kerajaan Gowa tetap memberikan perlawanan yang gigih atas seragan dan hujan peluru. Jatuh korban yang besar dari kedua belah pihak. Setelah terjadi pertempuran sengit antara Sultan Hasanuddin dengan Belanda dalam perang Makassar, seluruh Benteng Somba Opu dikuasai Belanda dan kemudian dihancurkan hingga terendam oleh ombak pasang pada tanggal 24 Juni 1669. Beribu kilo amunisi meledakkan Benteng yang tebalnya 12 kaki ini. Istana Somba Opu dibumihanguskan. Kejatuhan Benteng Somba Opu sekaligus merupakan kehancuran Imperium Kerajaan Gowa. Sultan Hasanuddin (Raja Gowa XVI) kalah dalam peperangan. Sultan Hasanuddin mundur ke Benteng Kale Gowa di Maccinik Sombala dan Mangkubumi Karaeng Karunrung meninggalkan istananya di Bontoala kemudian mundur ke Benteng Anak Gowa. Tetapi Belanda mengakui bahwa Perang Makassar merupakan perang yang dahsyat dan terbesar serta memakan waktu paling lama dibanding perang yang dialami Belanda lain di Nusantara. Sultan Hasanuddin dan pasukannya dijuluki ayam-ayam Jantan dari Timur karena semangatnya yang pantang mundur. Benteng dan istana Somba Opu diratakan dengan tanah oleh Belanda dengan demikian maka Makassar menjadi pusat pemerintahan dan perdagangan orang-orang Belanda, poros Somba Opu garis Makassar hilang. Tinggallah Makassar memasuki babak sejarah baru dan Somba

Opu yang pernah menjadi pusat pemerintahan kerajaan Gowa tinggal menjadi puing-puing (Sudawarni, 2020).

### **I.3.3 Gelombang Elektromagnetik**

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang memancar tanpa media rambat yang membawa muatan energi listrik dan magnet (elektromagnetik). Tidak seperti gelombang pada umumnya yang membutuhkan media rambat, gelombang elektromagnetik tidak memerlukan media rambat (sama seperti radiasi). Oleh karena tidak memerlukan media perambatan, gelombang elektromagnetik sering pula di sebut sebagai radiasi elektromagnetik (Benjamin Crowell, 2007). Gelombang elektromagnetik terbentuk karena fenomena yang terjadi antara medan magnetik dan medan listrik yang mengalami perubahan terhadap waktu (Hirose dan Loongren, 1985). Panjang gelombang berbanding terbalik dengan frekuensi; semakin rendah frekuensi, semakin panjang gelombangnya, dan sebaliknya, semakin tinggi frekuensi, semakin pendek panjang gelombangnya (Trisanti & Sudarti, 2021). Radiasi gelombang elektromagnetik terbagi 2 (dua) kelompok yaitu Radiasi peng-ion (ionisasi) dan Radiasi tidak peng ion (non-ionisasi). Radiasi pengion adalah radiasi yang memiliki frekuensi sangat tinggi serta memiliki energi yang dapat memecahkan elektron yang saling berikatan. Radiasi non-pengion adalah radiasi dengan frekuensi rendah dan memiliki energi yang tidak dapat memecahkan elektron (Iqlima, 2020). Gelombang elektromagnetik terbentuk dari kombinasi dua medan, yaitu medan magnet (B) dan medan listrik (E). Kedua medan ini bergetar dengan arah yang saling tegak lurus satu sama lain. Pembentuk dari medan magnet B dan medan listrik E adalah suatu gelombang transversal yang mana arah rambatnya adalah tegak dan lurus terhadap arah getarannya. Gelombang elektromagnetik dihasilkan 4 dari muatan listrik yang berosilasi dan mengalami percepatan, sehingga menciptakan gelombang elektromagnetik (Trisanti & Sudarti, 2021)

Melalui prinsip gelombang dapat dilakukannya interpretasi kondisi di bawah permukaan pada daerah penelitian. *Ground Penetrating Radar (GPR)*. merupakan Teknik geofisika yang menggunakan gelombang elektromagnetik, bersifat non destruktif dan mempunyai resolusi tinggi terhadap kontras dielektrik material bumi.



**Gambar 2** Spektrum Gelombang Elektromagnetik (Bahri, 2009)

Gelombang elektromagnetik memiliki konsep dasar dari persamaan *Maxwell*. Persamaan *Maxwell* ini menggambarkan sifat fisika secara matematis yang menjelaskan bagaimana terjadinya medan listrik dan medan magnet. Di sebuah ruang hampa atau medium udara. Variasi dari komposisi dan kandungan material dibawah permukaan mempengaruhi sifat dari material-material penyusun bumi. Hal ini akan berdampak pada cepat rambat dan juga atenuasi gelombang elektromagnetik yang merambat pada bawah permukaan bumi. Perbandingan energi yang dipantulkan dan energi yang datang disebut koefisien refleksi ( $R$ ) (Kearey dkk, 2002). persamaan untuk koefisien refleksi adalah sebagai berikut :

$$R = \frac{(v_2 - v_1)}{(v_1 + v_2)} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad (1)$$

Dimana  $v_1$  dan  $v_2$  merupakan kecepatan gelombang yang merambat pada medium 1 dan 2.  $\epsilon_1$  dan  $\epsilon_2$  merupakan konstanta dielektrik pada medium 1 dan 2 yang merupakan kapasitas dari suatu material dalam melewati muatan saat medan elektromagnetik melaluinya.  $\epsilon$  didefinisikan sebagai kapasitas dari suatu material dalam melewati muatan saat medan elektromagnetik melaluinya. Persamaan diatas dapat diaplikasikan dengan asumsi keadaan normal pada bidang datar dan tidak ada sinyal yang hilang sehubungan dengan *amplitude sinyal*.

Gelombang merupakan getaran yang merambat dalam dimensi ruang dan waktu. Gelombang merambatkan energi serta dapat diklasifikasikan berdasarkan media perambatan, arah rambatan, dan amplitudonya. Melalui medium perambatannya, gelombang terbagi menjadi dua jenis yaitu gelombang mekanis dan elektromagnetik.

Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang yang bisa merambat walaupun tidak ada medium perantaranya nya (Ruwanto, 2007). Gelombang elektromagnetik terbentuk karena fenomena yang terjadi antara medan magnetik dan medan Listrik yang mengalami perubahan waktu (Hirose dan Lonngren, 1985). Melalui prinsip tersebut gelombang dapat melakukan interpretasi kondisi bawah permukaan pada daerah penelitian yang dilakukan berdasarkan metode yang diterapkan. Salah satu metode yang menerapkan prinsip gelombang elektromagnetik adalah metode georadar.

**Tabel 1.** Resolusi dan daya tembus gelombang radar

Frekuensi Antena (MHz)	Ukuran Target terdeteksi minimum (m)	Aproksimasi jangkauan kedalaman (m)	Penetrasi kedalaman maksimum (m)
25	$\geq 1.0$	5-30	35-60
50	$\geq 0.5$	5-20	20-30
100	0.1-1.0	5-15	15-25
200	0.05-0.50	1-10	5-15
400	$\approx 0.05$	1-5	3-10
500	0.01	0.05-2	0.5-4

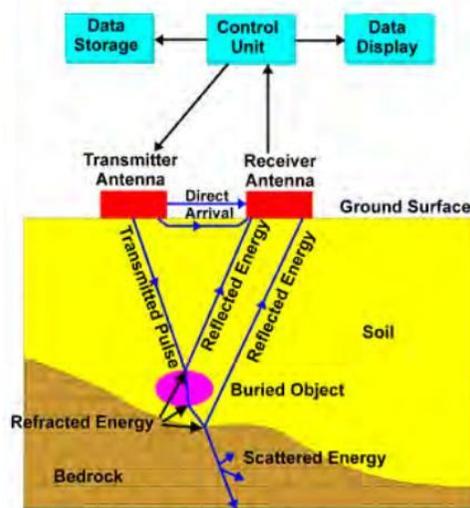
### I.3.4 Prinsip Dasar Metode GPR

Metode *Ground Penetrating Radar* adalah metode yang digunakan untuk mendeteksi kondisi bawah permukaan dan konstruksi bangunan. Metode ini menggunakan sinyal pantulan yang diterima oleh *receiver* akibat perbedaan konstanta dielektrik lapisan di bawah permukaan. System alat ini yaitu sinyal gelombang dikirimkan oleh *transmitter* lalu gelombang yang kembali akan terekam. *Ground Penetrating Radar* (GPR) merupakan suatu alat yang digunakan untuk proses deteksi benda – benda yang terkubur di bawah tanah dengan tingkat kedalaman tertentu, dengan menggunakan gelombang radio, biasanya dalam range 10 MHz sampai 1GHz (L.P. Ligthart, E.E. Ligthart,2004).

Komponen metode GPR terdiri dari *control unit*, antenna pemancar dan penerima, kabel penghubung, dan alat lainnya yang dapat mempermudah pengambilan data. Besar frekuensi antenna alat metode ini mempunyai *range* dari 100 MHz sampai 1GHz. *Control unit* berfungsi sebagai pengatur pengumpulan data, termasuk *transmitter* dan *receiver*. Komponen ini juga akan berfungsi sebagai penyimpanan sementara sebelum data

dipindahkan ke laptop/PC. *Transmitter* akan mengirimkan energi pada medium di bawah permukaan, lalu *receiver* mengubah sinyal yang diterima menjadi nilai integer. Untuk kabel yang digunakan, terdapat dua tipe konektor yaitu konektor bertanda R yang berguna untuk memberikan informasi dari control unit dan konektor bertanda D yang berguna untuk menerima informasi yang diperoleh ke *control unit*. Hasil *scan* dari alat akan akan ditampilkan berupa radargram dengan fungsi waktu *two-way travel time*, yakni waktu dari *transmitter* menuju target dan kembali ke *receiver*.

Aplikasi GPR dapat dibagi dalam 2 klasifikasi berdasarkan pada frekuensi antenna. Untuk aplikasi geologi, antenna dengan frekuensi < 500 MHz banyak digunakan karena penetrasi kedalaman lebih diutamakan dibandingkan dengan resolusinya. Untuk geoteknik, frekuensi yang digunakan lebih besar dari 500 MHz atau sekitar 1 GHz. ( Astutik, 1997).



**Gambar 3.** Akuisi Data GPR (Astutik, 1997)

Adapun faktor yang berpengaruh dalam menentukan tipe antenna yang digunakan, sinyal yang ditransmisikan, dan metode pengolahan sinyal yaitu (Arcone, 1984):

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

Dari proses pendeteksian oleh GPR, maka akan didapatkan suatu citra dari letak dan bentuk objek yang terletak di bawah tanah atau di permukaan tanah. Untuk

menghasilkan pendeteksian yang baik, suatu sistem GPR harus memenuhi empat persyaratan sebagai berikut (Arcone, 1984) :

- a. Kopling radiasi yang efisien ke dalam tanah.
- b. Penetrasi gelombang elektromagnetik yang efisien.
- c. Menghasilkan sinyal dengan amplitudo yang besar dari objek yang dideteksi.
- d. *Bandwidth* yang cukup untuk menghasilkan resolusi yang baik.

Teknik penggunaan metoda *Ground Penetrating Radar* adalah sistem *Electromagnetic Subsurface Profiling* (ESP), dengan cara memanfaatkan pengembalian gelombang elektromagnetik yang dipancarkan melalui permukaan tanah dengan perantara antena. Pemancaran dan pengembalian gelombang elektromagnetik berlangsung cepat sekali yaitu dalam satuan waktu *nano second*. Pengukuran dengan menggunakan GPR ini merupakan metode yang sangat tepat untuk mendeteksi bawah permukaan dengan kedalaman 0-10 meter. Karena itu metoda GPR sering digunakan oleh para peneliti untuk mengaplikasikan arkeologi, teknik sipil, pengindikasian dan instalasi bawah permukaan. Kecepatan gelombang elektromagnetik pada suatu medium selalu lebih rendah jika dibandingkan dengan kecepatan gelombang elektromagnetik di udara. Gelombang elektromagnetik melewati medium yang memiliki permitivitas lebih tinggi dibandingkan ketika merambat pada medium yang memiliki permitivitas lebih rendah. (Ibrahim & Bhinneka, 2019).

**Tabel 2.** Nilai parameter fisis dari beberapa material (*Geopro 10 Ground Penetrating Radar Manual*)

Name	Dielectric Constant	Velocity (cm/ns)	Name	Dielectric Constant	Velocity (cm/ns)
Air	1	30	Wet Granite	6.5	11.77
Snow	1.5	24.49	Travertime	8	10.61
Dry Soil	2.5	18.97	Wet Limestone	8	10.61
Dry Clay	4	15	Wet Basalt	8.5	10.29
Dry Sand	4	15	Agricultural Soil	11	9.05
Ice	4	15	Wet Concrete	12.5	8.49
Coal	4.5	14.14	Volcanic	13	8.32
Asphalt	5	13.42	Wet Sand	15	7.75
Dry Granite	5	13.42	Wet Sandy Soil	23.5	6.19

Frozen Sand/Gravel	5	13.42	Wet Monohyalrite	25	6
Dry Concrete	5.5	12.79	Wet Clay	27	5.77
Dry Limestone	5.5	12.79	Musky Coal	61.5	3.83
Dry Sand/Gravel	5.5	12.79	Organic Soil	64	3.75
Potassium	5.5	12.79	Seawater	81	3.33
Dry Sand Soil	6	12.25	Water	81	3.33
Dry Salt Mine	6	12.25			
Permafrost	6	12.25			
Syenite	6	12.25			
Wet Sandstone	6	12.25			
Name	Dielectric Constant	Velocity (cm/ns)	Name	Dielectric Constant	Velocity (cm/ns)
Air	1	30	Wet Granite	6.5	11.77
Snow	1.5	24.49	Travertime	8	10.61
Dry Soil	2.5	18.97	Wet Limestone	8	10.61

Berdasarkan dari tabel diatas nilai *deletric constant* dari bata sendiri adalah 5,5-5,7 yang dimana bata masuk kedalam golongan *dry concrete*, *dry limestone*, dan *dry sand/gravel*. GPR secara berkala memancarkan gelombang elektromagnetik ke bawah permukaan bumi dan pantulannya akan ditangkap oleh antenna penerima. Hasil dari tangkapan akan di rekam oleh GPR, dan hasilnya akan berupa gambar yang disebut sebagai *radargram* atau *radarsection* yang berwarna hitam-putih yang merupakan intensitas gelombang pantul, yang dimana warna hitam menunjukkan fase gelombang ketika amplitudo negatif, sedangkan warna putih menunjukkan fase gelombang ketika amplitudo positif. Gambar ini menunjukkan representasi dari struktur bawah permukaan tanah yang dipantulkan oleh gelombang radar yang dipancarkan dan dipantulkan kembali oleh berbagai material

di bawah permukaan. *Radargram* ini dapat menunjukkan lokasi dan kedalaman benda-benda seperti pipa, batu, dan reruntuhan bangunan di bawah tanah tergantung pada pengaplikasiannya dan kegunaannya.

### I.3.5 Persamaan Dasar Metode GPR (*Ground Penetrating Radar*)

Dasar teori metode georadar yaitu persamaan *Maxwell* yang menjelaskan sifat-sifat medan magnet dan medan listrik dengan sumbernya. Kecepatan perambatan gelombang elektromagnetik yang bergerak dalam ruang hampa dipengaruhi oleh permeabilitas dan permitivitas dalam ruang hampa yaitu sebesar:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2)$$

Keterangan :

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ henry / m}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ farad / m}$$

Persamaan (II.1) di atas diturunkan dari persamaan *Maxwell* (*Maxwell's equation*).

Persamaan *Maxwell* terdiri dari empat persamaan yang dapat dituliskan sebagai berikut : (Supriyanto, 2007)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \sigma \vec{E} + \epsilon \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (6)$$

Dimana:

$\rho$  = Tahanan jenis ( $\Omega \cdot m$ )

E = Kuat medan listrik (V/m)

J = Rapat Arus ( $A/m^2$ )

B = Induksi magnet (weber/meter<sup>2</sup>)

$\epsilon_0$  = Permittivitas Listrik dalam ruang hampa ( $8,85 \times 10^{-12} C^2 / Nm^2$ )

$\mu_0$  = Permeabilitas Magnet dalam ruang vakum ( $4 \times 10^{-7} T.m/A$ ) (Griffith, 1999)

Dalam medium *linear* dan homogen, kecepatan gelombang elektromagnetik dirumuskan sebagai

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (7)$$

Berdasarkan persamaan diatas maka didapat persamaan konstanta dielektrik sebagai,

$$\frac{c}{v} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}} \quad (8)$$

Maka diperoleh persamaan sebagai,

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (9)$$

Dimana,  $c$  merupakan laju cahaya pada ruang hampa,  $v$  merupakan kecepatan gelombang elektromagnetik dan  $\epsilon_r$  merupakan konstanta dielektrik (Griffith, 1999)

Kecepatan gelombang elektromagnetik pada suatu material yang menjadi medium perambatan mempunyai nilai yang lebih kecil daripada kecepatannya dalam ruang hampa. Besar kecepatan ini ditentukan oleh indeks bias yang dimiliki oleh material tersebut. Indeks bias suatu material adalah faktor dimana kecepatan radiasi elektromagnetik mengalami perlambatan pada material tersebut, relative terhadap kecepatannya dalam ruang hampa.

### 1.3.6 Permittivitas Dielektrik dan Konduktivitas

Perambatan gelombang elektromagnetik pada suatu material dipengaruhi beberapa sifat fisis. Sifat-sifat fisis tersebut adalah permittivitas dielektrik dan konduktivitas (Ninje, 2017). Dalam GPR permittivitas dielektrik dan konduktivitas suatu material sangatlah penting karena berhubungan dengan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan antenna pemancar dan dibaca antenna penerima (Annan, 2004).

Permittivitas dielektrik adalah kemampuan suatu material untuk menyimpan dan melepas energi elektromagnetik dalam bentuk muatan listrik dan secara klasik berhubungan dengan kemampuan penyimpanan dari kapasitor (Jol, 2008). Pada umumnya

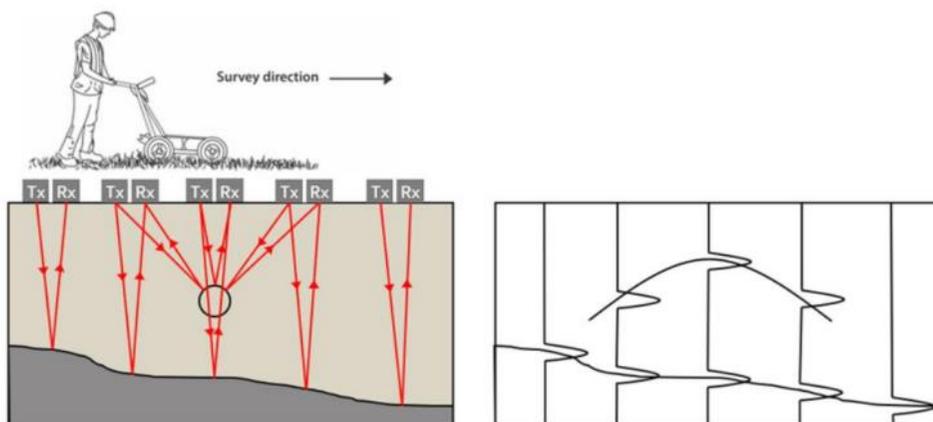
permitivitas dielektrik bentuk *non-dimensional* atau bisa disebut permitivitas relative ( $\epsilon_r$ ) :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (10)$$

Untuk simbol  $\epsilon_0$  melambangkan permitivitas vakum dengan nilai  $8,8542 \times 10^{12} F.m^{-1}$  dan simbol  $\epsilon$  yaitu permitivitas suatu material. Konstanta dielektrik ( $\epsilon_r$ ) ini bervariasi, mulai dari 1 yang merupakan udara hingga 80 yang merupakan air laut (Reynolds, 1997).

### I.3.7 Resolusi Horizontal

Resolusi horizontal/lateral yaitu resolusi yang menggambarkan jarak antara objek di permukaan. Untuk skin depth dimana frekuensi yang dipancarkan ke bawah permukaan hanya berhubungan dengan jarak kedalaman dari permukaan tanah tersebut. Resolusi horizontal adalah jarak antara dua transmisi yang berdekatan. Berbagai target bawah permukaan menunjukkan karakteristik yang berbeda pada gambar *B-scan*. Misalnya, struktur lapisan tanah horizontal ditandai dengan kurva dengan bentuk yang mirip dengan antar muka, sedangkan objek silinder seperti pipa bawah tanah.



**Gambar 4.** Prinsip Resolusi horizontal Dalam Metode GPR

### I.3.8 Metode GPR untuk Identifikasi Situs Arkeologi Terpendam

*Ground Penetrating Radar (GPR)* merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mendeteksi benda-benda yang terkubur di bawah tanah dengan Tingkat kedalaman tertentu, dengan menggunakan sumber gelombang elektromagnetik berupa radar (*Radio detection and ranging*) yang biasanya berada dalam range 10 MHz-1GHz (Heteren, dkk., 1998). Metode ini bersifat tidak merusak dan mempunyai resolusi yang

tinggi, tetapi terbatas sampai kedalaman beberapa puluh meter saja, dan dapat digunakan pada segala waktu dan cuaca (Knight, 2001). Metode GPR adalah salah satu metode geofisika *non-destruktif* yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi untuk mencitrakan kondisi bawah permukaan dangkal secara kontinyu, cepat, dan beresolusi tinggi. Secara prinsip, metode ini terdiri dari unit sentral, antena pemancar, dan antena penerima. Unit sentral menciptakan gelombang elektromagnetik yang kemudian dipancarkan antena pemancar ke bawah permukaan (Luga, 2019). *Ground Penetrating Radar* (GPR) telah umum digunakan dalam penelitian arkeologi untuk menyediakan pencitraan tiga dimensi situs arkeologi yang terkubur dibawah permukaan. Kemampuan GPR untuk dengan cepat dan tepat mengestimasi kedalaman terhadap fitur benda arkeologis yang terkubur adalah keunggulan utama GPR dibandingkan metode geofisika lainnya yang umum digunakan di arkeologi, mengingat bahwa akurasi dan kontrol spasial bawah permukaan yang tepat sangat penting untuk Sebagian besar penelitian arkeologi.

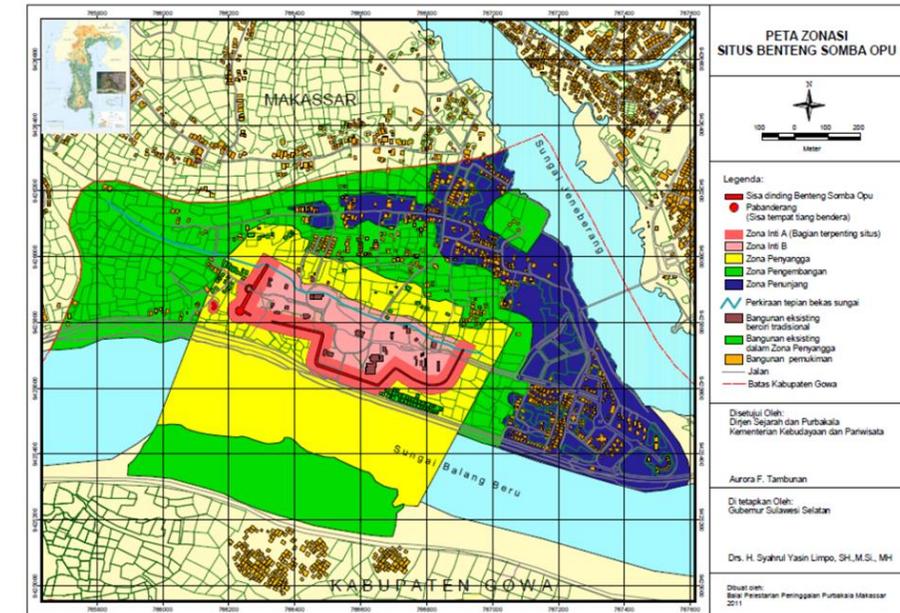
Metode GPR didasarkan pada propagasi dan refleksi gelombang EM yang sensitif terhadap variasi parameter EM di bawah tanah, terutama konstanta dielektrik dan listrik konduktivitas (Davis and Annan, 1989). Meskipun kedalaman penetrasi yang relatif rendah (terutama pada penggunaan antena frekuensi tinggi dengan lingkungan konduktif), kemampuan resolusi GPR (bergantung pada frekuensi dan properti tanah), jauh lebih besar dari yang diperoleh oleh metode geofisika lainnya, membuat teknik ini cocok untuk studi dangkal beresolusi tinggi seperti aplikasi arkeologi dan pemetaan stratigrafi dangkal. Situs arkeologi yang terkubur, memiliki bentuk dan kedalaman tertentu yang perlu diketahui terlebih dahulu sebelum dilakukan ekskavasi agar dapat meminimalisir kerusakan situs akibat proses ekskavasi. Maka dari itu, visualisasi penampang GPR secara 3D sangat diperlukan untuk mengetahui bentuk dan kedalaman situs maupun target yang akan diekskavasi. Penggunaan teknik visualisasi 3D sangat penting dalam penelitian arkeologi untuk menampilkan data yang kompleks dengan tampilan yang mudah dimengerti, sehingga meningkatkan kualitas dan efisiensi interpretasi arkeologis (Luigia N, dkk., 2002).

## BAB II

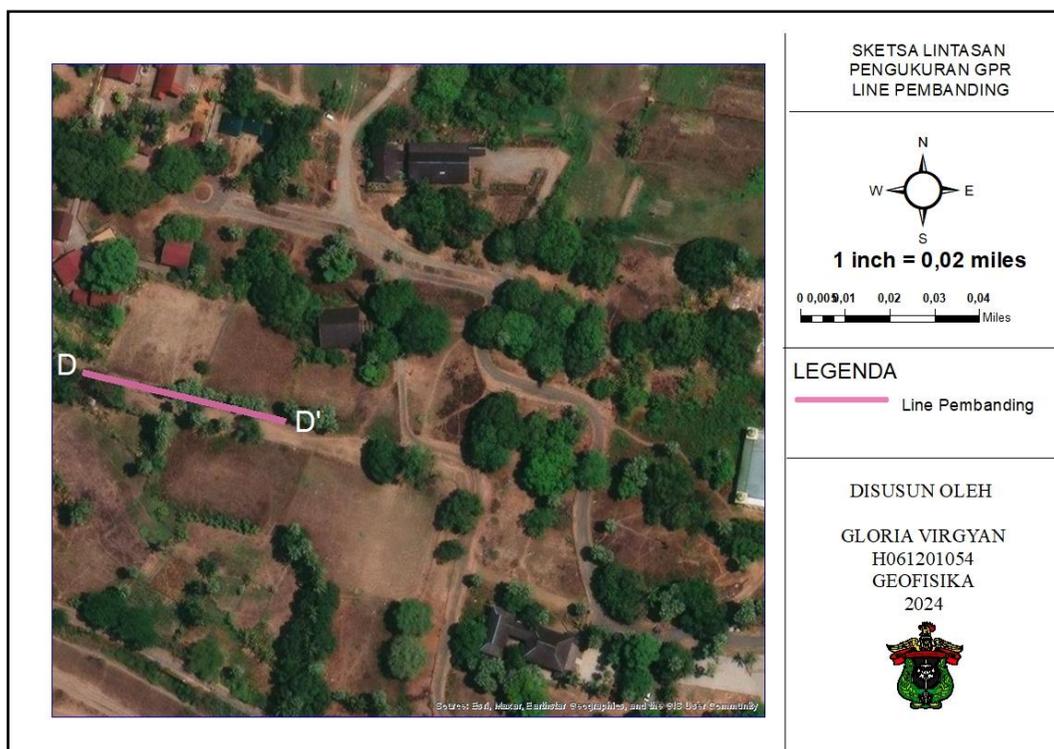
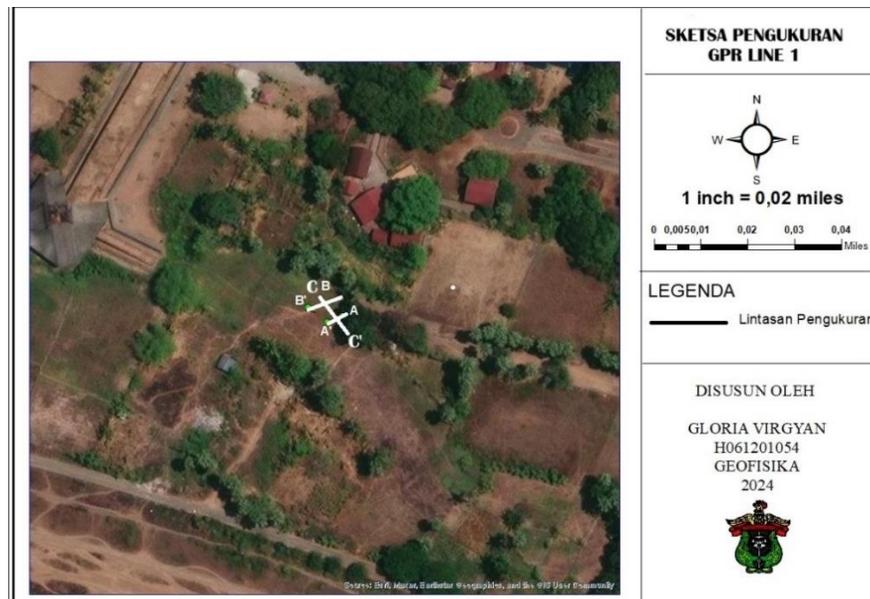
### METODE PENELITIAN

#### II.1 Lokasi Penelitian

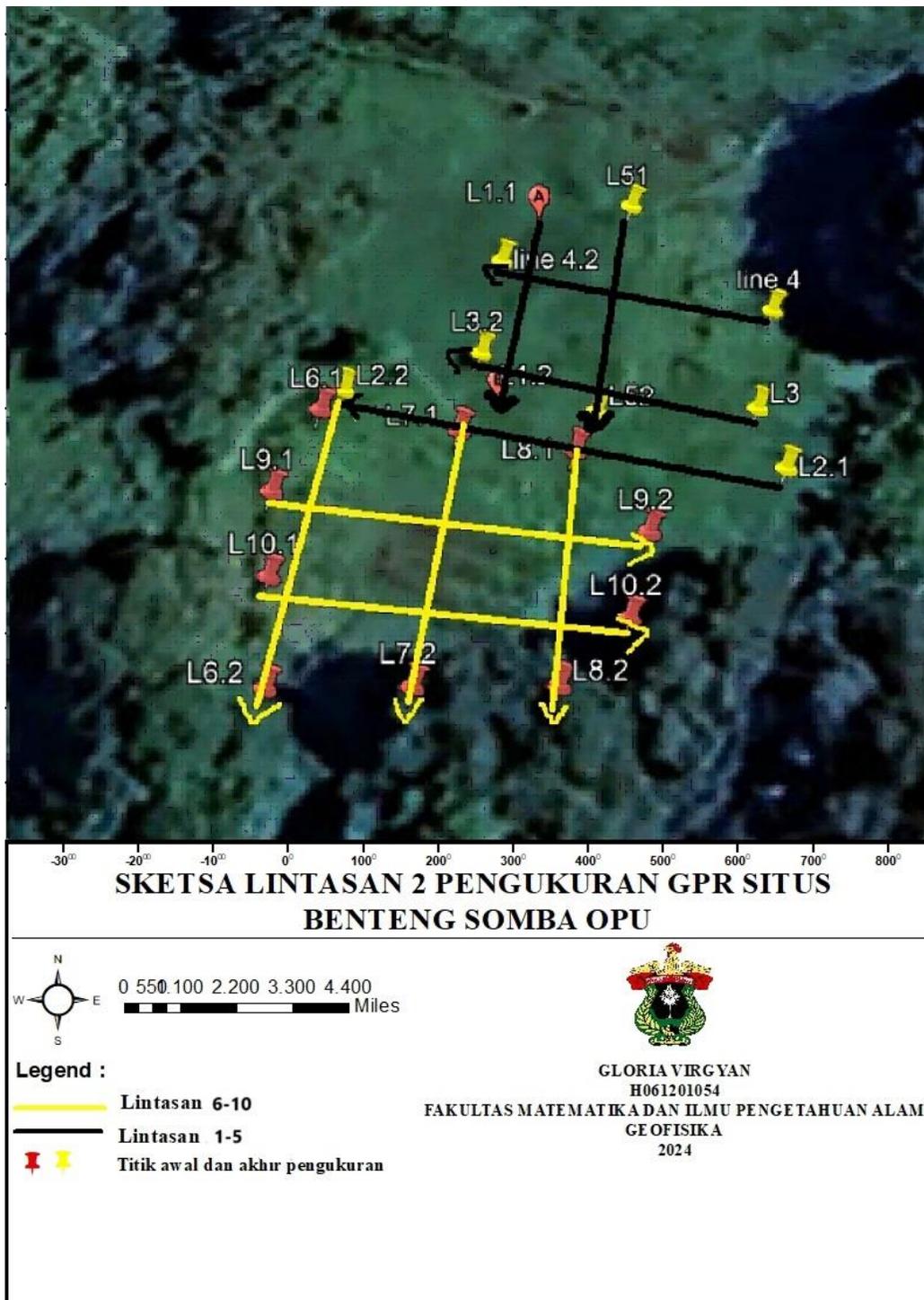
Penelitian ini dilakukan di Benteng Somba Opu yang terletak di Kecamatan Barombong, Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Secara geografis terletak pada  $5^{\circ}11'22''\text{LS}$ ,  $119^{\circ}24'4''\text{BT}$  dengan ketinggian 0-10 meter



**Gambar 5.** Peta Zonasi Benteng Somba Opu (Sumber : Zonasi Benteng Somba Opu, 2011)



**Gambar 6.** Sketsa Lintasan Pengukuran GPR Zona 1 dan Line Pembanding



Gambar 7. Sketsa Lintasan Pengukuran GPR Zona 2

## II.2 Alat dan Bahan

### II.2.1 Alat

Penelitian ini menggunakan alat yaitu

1. GPR Geopro 10 frekuensi 200 MHz
2. Meteran Tancap
3. Laptop
4. Tali raphia

### II.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Data RAW hasil pengukuran dengan format "srd"
2. Data daerah penelitian dari BPCB makassar

## II.3 Prosedur Penelitian

### II.3.1 Tahap Pengambilan data

1. Melakukan persiapan pengukuran dengan membuat desain survei
2. Membuat *grid line* 10 x 10meter menggunakan meteran tancap dan tali rafia dengan menyesuaikan arah dan Panjang bentangan
3. Membuat lintasan searah dengan posisi *vertical* dari *grid* menggunakan tali rafia dengan jarak antar lintasan 5 meter
4. Membuat lintasan searah dengan posisi *horizontal* dari *grid* menggunakan tali dengan jarak antar lintasan 5 meter
5. Menyiapkan alat GPR Geopro 10
6. Melakukan pengukuran setiap lintasan dimulai dengan lintasan *vertical* paling kiri
7. Melakukan pengukuran setiap lintasan dimulai dengan lintasan *horizontal* paling atas

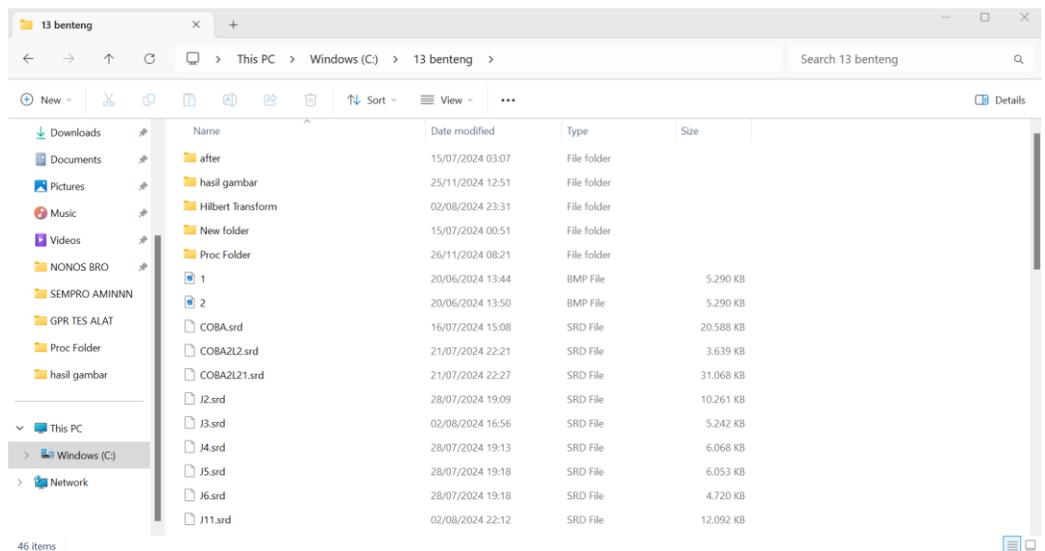
### II.3.2 Tahap Pengolahan Data

1. Menjalankan perangkat lunak *GeoProProjector*. Buka aplikasi *GeoProProjector*



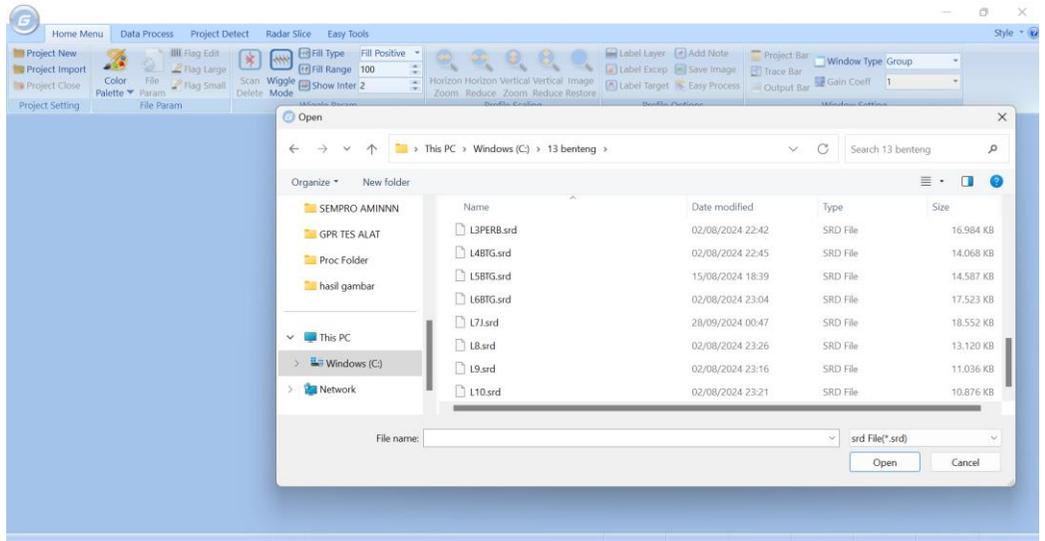
**Gambar 8.** Menjalankan perangkat lunak *GeoProProjector*

2. Membuat *working directory* yang sesuai dengan lokasi penyimpanan data mentah hasil akuisi



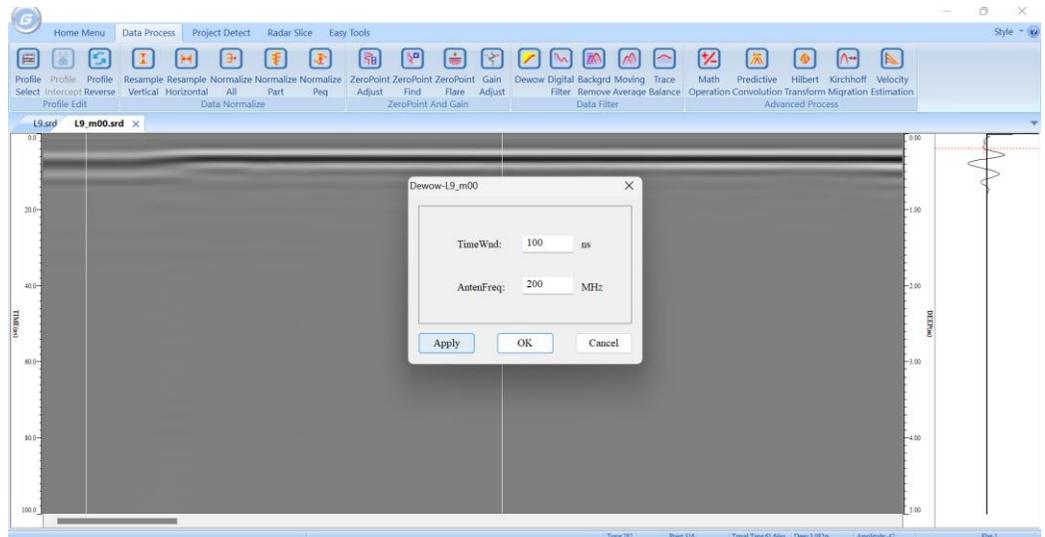
**Gambar 9.** Membuat *working directory*

3. Memasukkan data hasil pengukuran dengan format “srd” di *software GeoProProjector*. Pada tahap ini, data hasil akuisi dimasukkan ke dalam *software GeoProProjector*. Tahapan input data ialah klik *ikon G* pada pojok kiri atas > *Open File* > Pilih *File* yang akan diolah > Klik *OK*. Data yang sudah dimasukkan akan terlihat seperti gambar di bawah ini.



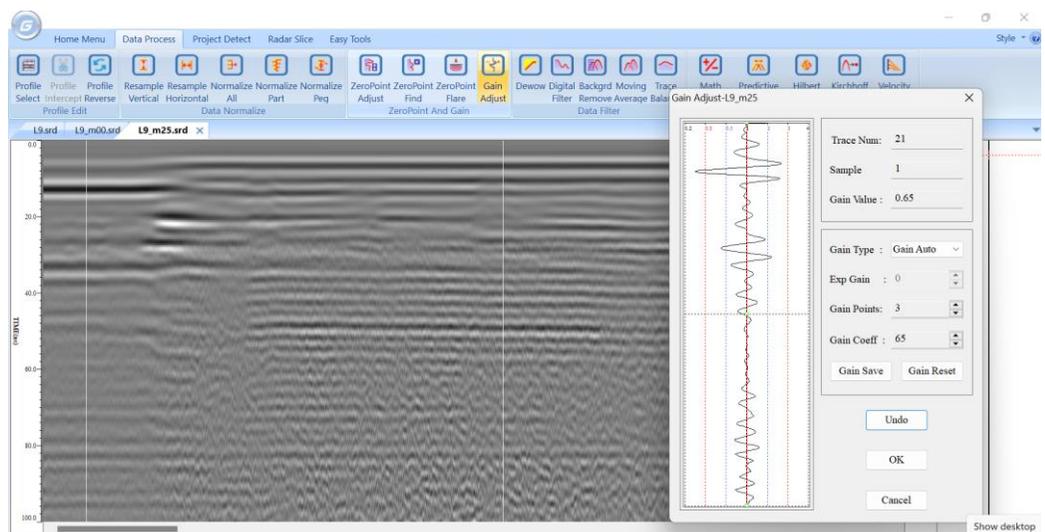
**Gambar 10** Memasukkan data hasil pengukuran

4. Melakukan *processing* data dengan menerapkan filter *dewow*, yang dimana fungsi *dewow* untuk menghilangkan. *Noise* ini dapat mengganggu sinyal yang sebenarnya dan membuat interpretasi menjadi lebih sulit. *Dewow* digunakan untuk menghilangkan frekuensi rendah akibat adanya induksi gelombang elektromagnetik yang terekam sehingga menjadi *noise*. Tahapannya ialah klik pada menu *tab Data Process > Dewow >* isi nilai *dewow* sesuai kebutuhan, dalam hal ini menggunakan *TimeWnd: 100 ns* dan *AntenFreq: 200 Mhz >* klik OK.



**Gambar 11.** prosesi data dengan menerapkan filter *dewow*

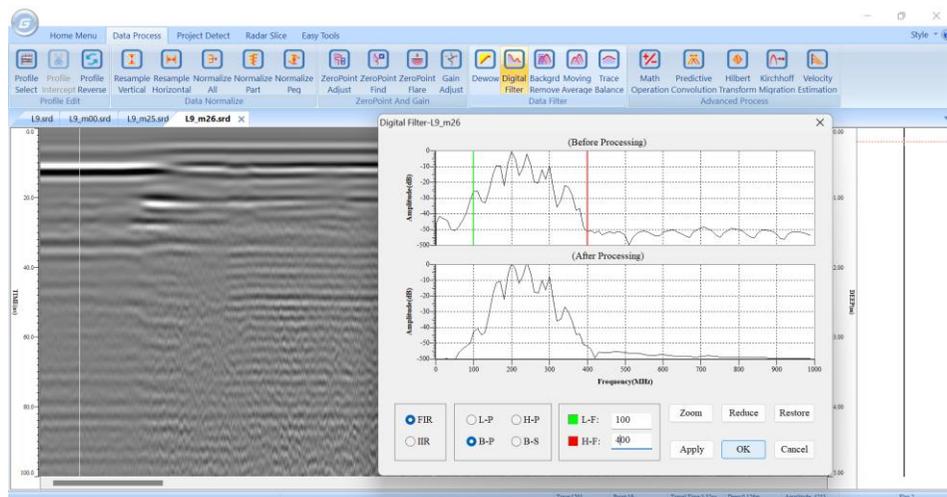
5. Melakukan *Gain Adjust* yaitu menyesuaikan amplitudo sinyal dalam data GPR untuk memperjelas kualitas visualisasi datanya karena sinyal GPR cenderung melemah seiring bertambahnya kedalaman akibat atenuasi karena sinyal GPR cenderung melemah seiring bertambahnya kedalaman akibat atenuasi energi radar.



**Gambar 12.** Melakukan *Gain Adjust*

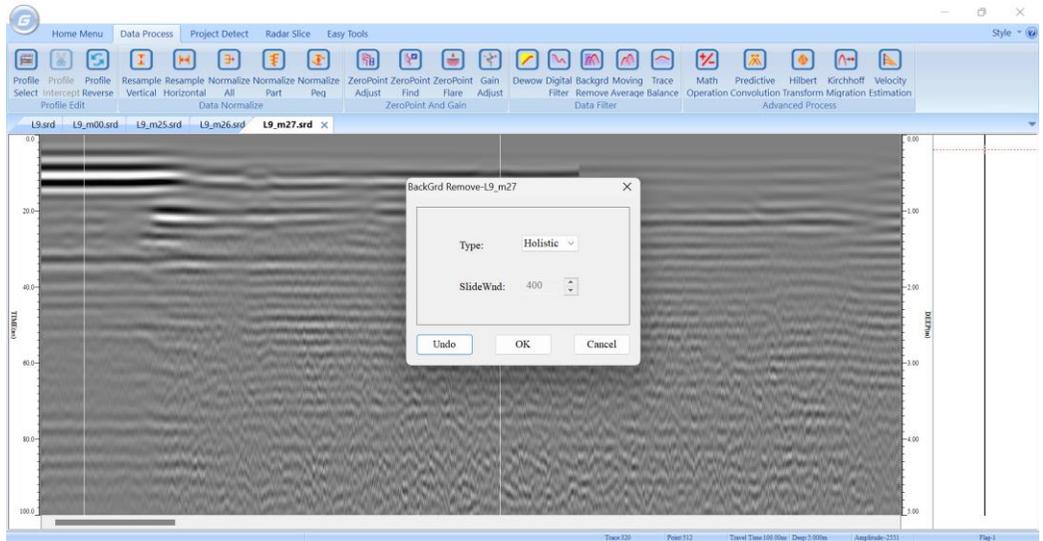
6. Setelah melakukan *Gain Adjust* lanjut ke *Digital filter* dilakukan untuk meningkatkan kualitas sinyal. Meningkatkan kualitas sinyal agar mempermudah

interpretasi menggunakan *digital filter*. Pada menu *tab Data Process* pilih Digital Filter, masukkan nilai L-F dan H-F sesuai dengan frekuensi alat. L-F (*Low Frequency*) mengacu pada batas frekuensi bawah sedangkan H-F (*High Frequency*) mengacu pada batas frekuensi atas. Untuk mengetahui nilainya, digunakan rumus sebagai berikut: L-F =  $\frac{1}{2}$  dari frekuensi alat yang digunakan H-F =  $2x$  dari frekuensi alat yang digunakan Karena alat yang digunakan saat pengukuran menggunakan frekuensi 200 MHz maka nilai dari L-F = 100 dan H-F = 400. Kemudian tekan OK.



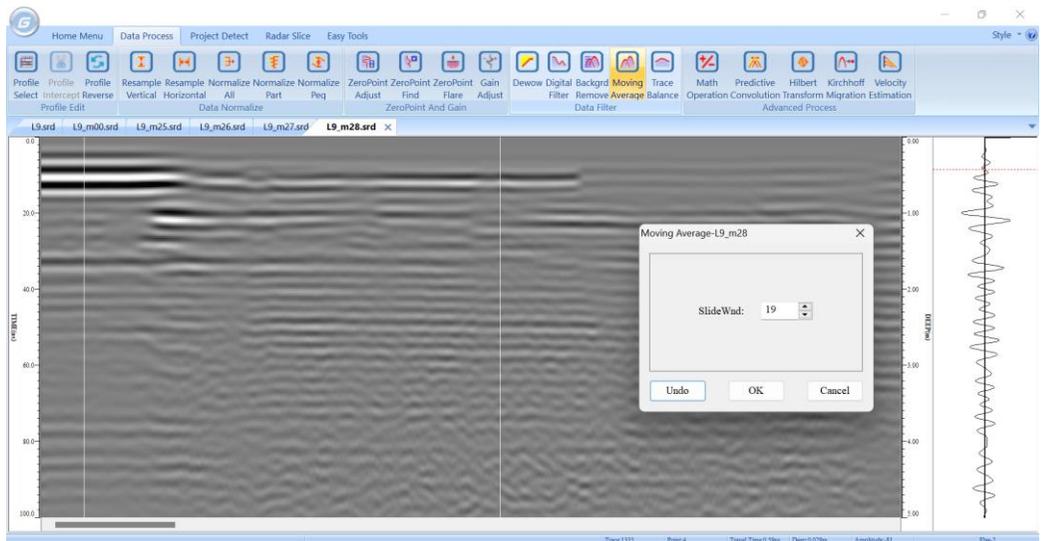
**Gambar 13.** Melakukan *Digital filter*

- Setelah itu melakukan *Background Remove* yang bertujuan untuk menghapus sinyal latar belakang konstan yang tidak diinginkan dari data GPR agar meningkatkan kualitas sinhal dan memperjelas interpretasinya.



**Gambar 14.** Melakukan *Background Remove*

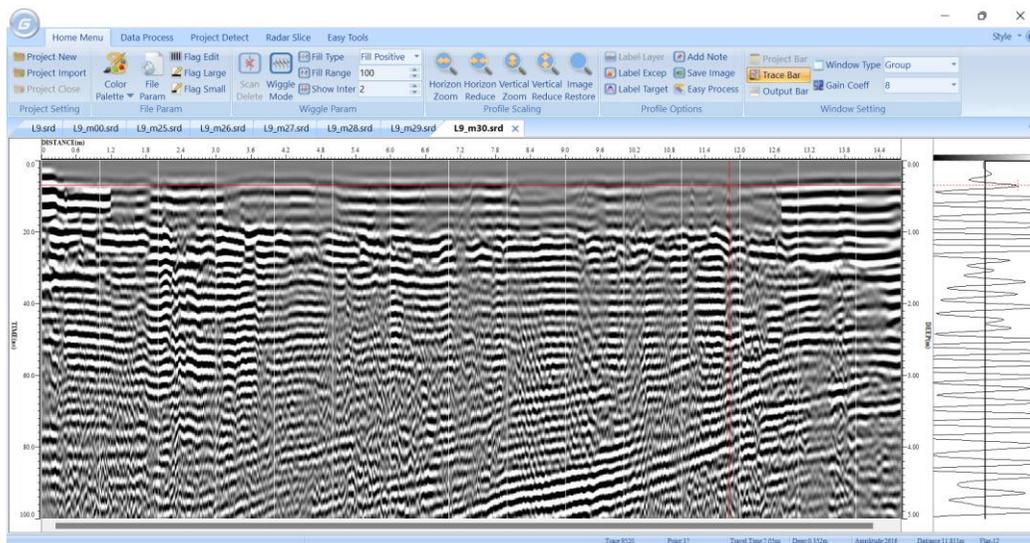
8. Yang terakhir melakukan *moving average* yang bertujuan untuk memperhalus data GPR dalam mengurangi *noise* dan memperlihatkan pola yang lebih jelas.



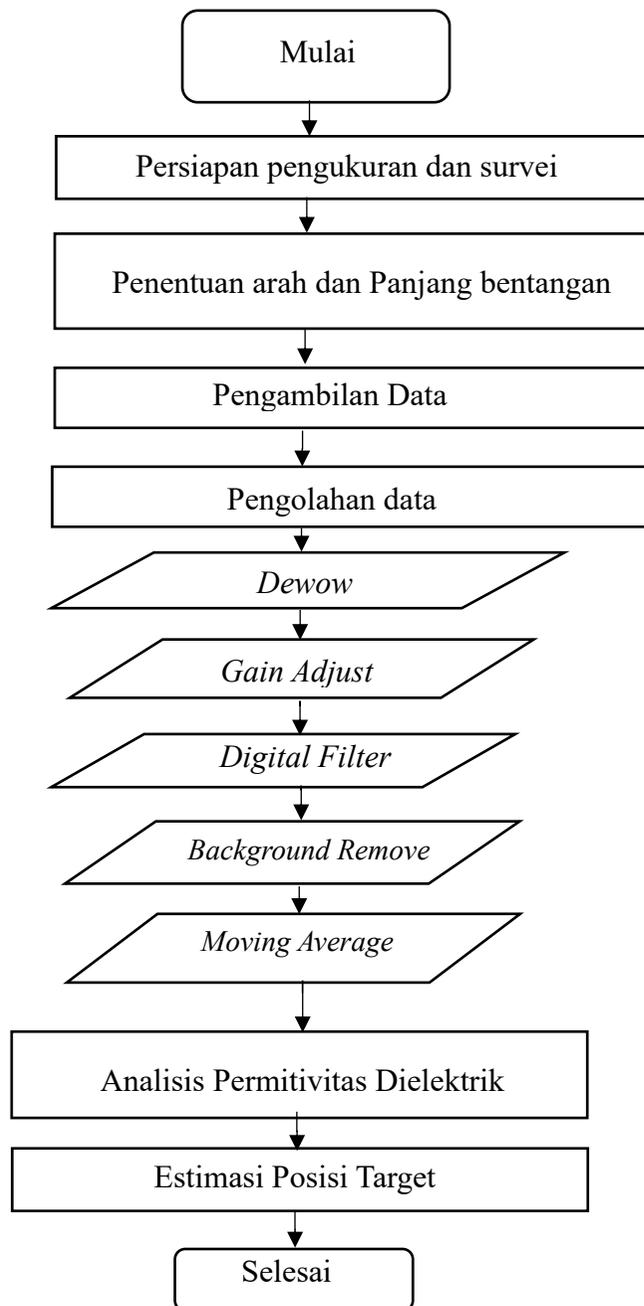
**Gambar 15.** Melakukan *moving average*

9. Melakukan analisis permitivitas dielektrik, ini dilakukan untuk mengidentifikasi Jenis Material berdasarkan respons gelombang radar
10. Estimasi posisi target, ini dilakukan untuk menentukan lokasi objek secara Akurat

Gambar 16 Estimasi posisi target



## II.4 Bagan Alir

**Gambar 17.** Bagan Alir