

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan zaman, kebutuhan manusia akan berbagai infrastruktur, seperti air, listrik, gas, dan telekomunikasi semakin meningkat. Hal ini mendorong pesatnya pembangunan infrastruktur, termasuk pemasangan jaringan utilitas bawah tanah yang harus mengikuti pedoman penempatan utilitas (Nurjaya et al., 2004.). Namun, pesatnya pembangunan tersebut seringkali tidak diiringi dengan pemetaan yang memadai, sehingga posisi pasti jaringan utilitas bawah tanah seringkali tidak diketahui secara jelas (Banin et al., 2017).

Keadaan ini tidak hanya berakibat pada potensi kerusakan utilitas saat proses renovasi, tetapi juga dapat membahayakan keselamatan pekerja dan penghuni bangunan. Oleh karena itu, sebelum melakukan renovasi, penting untuk melakukan pemetaan utilitas bawah tanah secara menyeluruh untuk menghindari risiko kerusakan dan kecelakaan kerja (Wang et al., 2019). Salah satu metode pemetaan utilitas bawah tanah yang efektif dan akurat adalah GPR (*Ground Penetrating Radar*). GPR memanfaatkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi objek-objek bawah permukaan, termasuk jaringan utilitas seperti pipa air, kabel listrik, dan kabel telekomunikasi (Benedetto, 2015).

Alat metode GPR terdiri dari *transmitter* dan *receiver*. *Transmitter* menghubungkan antena dengan sumber pulsa, dan *receiver* menghubungkan antena dengan unit pengolahan. Alat GPR bekerja dengan cara sinyal gelombang dikirim, dipantulkan oleh diskontinuitas di tanah, dan kemudian diterima kembali oleh antena yang menerima. Hasil yang ditampilkan pada display unit akan berupa gambar penampang jarak dan kedalaman yang diproses, yang membuat data lebih mudah dipahami.

Metode GPR memiliki aplikasi yang kurang baik jika media tanahnya basah, tanah liat, lempung, air asin, atau sedimen berbutir halus yang dapat menyerap energi dan mencegah penjarangan pulsa, sinyal akan rusak dan hasilnya akan sulit dibaca. Namun, kelebihan metode ini adalah mudah digunakan dan tidak merusak. Keuntungan tersebut digunakan untuk menemukan utilitas yang berguna untuk melakukan perawatan atau mencegah kerusakan saat penggalian, di mana utilitas biasanya berada di bawah permukaan.

I.2 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian dilakukan di area JK Arenatorium kampus Universitas Hasanuddin
2. Data yang digunakan terdiri dari data primer menggunakan alat GPR dengan frekuensi 200 MHz yang diperoleh dari hasil pengukuran di daerah penelitian.
3. Penelitian ini dilakukan di atas jalan beton dengan 3 lintasan yang memiliki panjang yang sama dan saling paralel dengan interval spasi 1,5 meter

I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah

1. Mengetahui kecepatan gelombang radar anomali utilitas pada daerah penelitian
2. Mengetahui keberadaan utilitas di bawah permukaan pada lokasi daerah penelitian.

I.4 Manfaat Penelitian

Secara teoritis hasil penelitian ini dapat menjadi referensi penting bagi penelitian-penelitian selanjutnya yang berfokus pada deteksi utilitas bawah permukaan atau penggunaan teknologi GPR dalam bidang lain.

Secara praktis penelitian ini bermanfaat dengan adanya deteksi yang akurat menggunakan GPR dapat mengurangi biaya operasional yang terkait dengan perbaikan kerusakan yang tidak terduga dan pengerjaan ulang. Hal ini memberikan manfaat ekonomis bagi pengelolaan infrastruktur.

I.5 Ground Penetrating Radar

Ground Penetrating Radar (GPR) adalah teknik geofisika non-invasif yang digunakan untuk menyelidiki sifat bawah permukaan berbagai bahan dan struktur. *GPR* bekerja dengan mengirimkan pulsa elektromagnetik frekuensi tinggi ke tanah dan mendeteksi refleksi yang melonjak kembali dari fitur bawah permukaan. Teknologi ini telah menemukan aplikasi yang luas di bidang-bidang seperti arkeologi, geologi, studi lingkungan, teknik sipil, dan banyak lagi (Bristow, 2013).

Seperti pada sistem radar pada umumnya, sistem GPR terdiri atas pengirim (*transmitter*) yaitu antena yang terhubung ke sumber pulsa, dan bagian penerima

(receiver), yaitu antena yang terhubung ke unit pengolahan sinyal dan citra. Adapun dalam menentukan tipe antena yang digunakan, sinyal yang ditransmisikan dan metode pengolahan sinyal tergantung pada beberapa hal, yaitu (Oktafiani et al., 2016):

- a. Jenis objek yang akan dideteksi
- b. Kedalaman Objek
- c. Karakteristik elektrik medium tanah

Dari proses pendeteksian seperti di atas, maka akan didapatkan suatu citra dari letak dan bentuk objek yang terletak di bawah tanah. Untuk menghasilkan pendeteksian yang baik, suatu sistem GPR harus memenuhi empat persyaratan sebagai berikut (Oktafiani et al., 2016):

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

I.6 Prinsip Dasar Ground Penetrating Radar

Prinsip dasar GPR terletak pada interaksi gelombang elektromagnetik dengan material bawah permukaan. Ketika pulsa radar ditransmisikan ke tanah, gelombang elektromagnetik bertemu dengan bahan yang berbeda dengan sifat dielektrik yang berbeda. Sifat-sifat ini mempengaruhi bagaimana gelombang melemah, tersebar, atau diserap saat mereka menjalar melalui bawah permukaan. Ketika gelombang radar bertemu dengan perbatasan antara bahan dengan sifat dielektrik yang kontras, seperti tanah dan batu, beberapa gelombangnya terefleksikan kembali ke permukaan. Refleksi ini ditangkap oleh sistem GPR dan digunakan untuk membuat gambar bawah permukaan (Bristow, 2013).

Pada dasarnya GPR bekerja dengan memanfaatkan pantulan sinyal. Teknik penggunaan metode GPR adalah sistem *Electromagnetic Subsurface Profiling* (ESP) dengan cara memanfaatkan pengembalian gelombang elektromagnetik yang dipancarkan melalui permukaan tanah dengan perantara antena. Rangkaian pemancar akan menghasilkan pulsa listrik dengan bentuk *PRF* (*pulse repetition frequency*), energi dan durasi tertentu. *Pulse repetition frequency* merupakan nilai yang menyatakan seberapa sering pulsa radar diradiasikan ke dalam tanah. Penentuan *PRF* tergantung dengan kedalaman maksimum yang ingin dicapai. Semakin dalam objek, maka *PRF* juga semakin kecil karena waktu tunggu semakin lama (Ayi, 2009).

I.6.1 Gelombang Elektromagnetik (EM)

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang dapat merambat walaupun tidak ada medium dan merupakan gelombang transversal yang berupa E dan medan magnet B saling tegak lurus dan keduanya tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Persamaan gelombang elektromagnetik dalam GPR dapat dijelaskan dalam persamaan Maxwell. Yaitu empat persamaan diferensial yang menyatakan arah perambatan, transmisi, refleksi, dan juga difraksi pada gelombang elektromagnetik persamaan-persamaan tersebut adalah (Elfarabi et al., 2017) :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu\sigma\vec{E} + \epsilon\mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

Dimana:

E = Kuat medan Listrik (V/m)

B = Induksi Magnetik (Wb/m² atau Tesla)

μ = Permeabilitas Magnetik (H/m)

σ = Konduktivitas Listrik (mS/M)

ϵ = Permittivitas Listrik (F/m)

t = Waktu (s)

I.6.2 Kecepatan Gelombang Radar

"Kecepatan" merujuk pada kecepatan gelombang. Kecepatan gelombang radar sangat bergantung pada konstanta dielektrik medium. Kecepatan gelombang dalam medium dapat dihitung dengan menggunakan persamaan diferensial, yang menunjukkan arah perambatan, transmisi, refleksi, dan difraksi gelombang elektromagnetik. Persamaan ini dapat dituliskan sebagai berikut (Musset & Khan, 2000).

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

$$\text{Dimana:} \quad \epsilon_r = \sqrt{\mu\epsilon} \quad (6)$$

V_m = Kecepatan Gelombang Radar dalam Medium (m/ns)

ϵ_r = Permittivitas Relatif

Persamaan Maxwell adalah landasan teori dari perambatan gelombang elektromagnet. Pada material dielektrik murni, suseptibilitas magnetik (μ), dan permitivitas listrik (ϵ) adalah konstan dan tidak terdapat atenuasi dalam perambatan gelombang. Tidak sama halnya jika berhadapan dengan material dielektrik (Reynolds, 1997).

Impedansi listrik dipengaruhi oleh beberapa perubahan yaitu (Francke & Nobes, 2000):

- Kadar air: Koefisien dielektrik air yang tinggi memperlambat atau menghalangi lewatnya gelombang radar. Batuan memiliki kadar air yang rendah dan dengan demikian memiliki kecepatan radar yang tinggi.
- Konduktivitas: konduktif dari sedimen aluvial dapat mempengaruhi perjalanan gelombang radar ke material yang lebih dalam dan membatasi penetrasi.
- Persentase Besi: mineral yang memiliki konsentrasi magnetik seperti beda dapat menyebabkan pantulan radar pada bands horizontal

Sifat-sifat dari material bumi bergantung dari komposisi dan kandungan air material tersebut. Kedua hal ini mempengaruhi cepat rambat perambatan gelombang dan atenuasi gelombang elektromagnet.

Kecepatan material utilitas secara umum pada medium tanah kering adalah sebagai berikut (Luga et al., 2019):

Tabel 1. Kecepatan material utilitas secara umum pada medium tanah kering

Utilitas	Kecepatan (m/ns)
Pipa pvc	0,04-0,08 m/ns
Pipa Besi	0,10-0,15 m/ns
Kabel	0,12-0,18 m/ns

I.6.3 Koefisien Refleksi dan Pembalikan Fasa Gelombang

Variasi bawah permukaan yang dapat menyebabkan transmisi gelombang menentukan keberhasilan metode GPR. Koefisien refleksi (R) ditentukan oleh perbedaan cepat rambat gelombang elektromagnet, yang merupakan perbandingan energi yang direfleksikan. Dalam istilah yang lebih sederhana, koefisien refleksi adalah perbedaan konstanta dielektrik relatif dari media yang berdekatan. Ini ditunjukkan oleh persamaan berikut (Kunz & Luebbers, 1993)

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (7)$$

$$R = \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} \quad (8)$$

Dimana V_1 merupakan cepat rambat gelombang elektromagnet pada lapisan 1, V_2 adalah cepat rambat gelombang elektromagnet pada lapisan 2, dan $V_1 < V_2$, sedangkan ϵ_1 dan ϵ_2 yaitu konstanta dielektrik relatif lapisan 1 dan lapisan 2.

Penampang rekaman GPR akan menunjukkan variasi warna sebagai hasil dari besar amplitudo rekaman GPR $r(t)$. Energi hilang melalui refleksi atau transmisi di sekitar batas lapisan. Jika sebuah benda memiliki panjang gelombang dan dimensi yang sama, benda tersebut akan mengirimkan energi secara acak. Absorpsi, proses mengubah energi elektromagnet menjadi energi panas, juga dapat menyebabkan energi hilang. Atenuasi (α) tergantung pada konduktivitas (σ), permeabilitas magnetik (μ), dan permitivitas (ϵ) media yang dilalui sinyal dan frekuensi sinyal itu sendiri ($2\pi f$). Ini adalah penyebab utama hilangnya energi karena atenuasi fungsi kompleks dari sifat listrik dan dielektrik media yang dilalui sinyal radar. Sifat fisik unsur pokok dan komposisinya menentukan sifat bulk material (Reynolds, 1997).

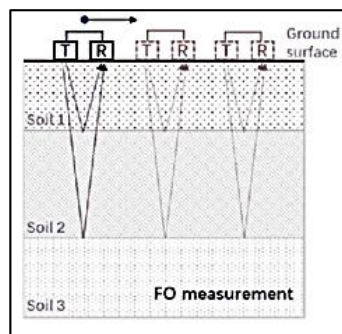
I.7 Teknik Akuisisi Data

Terdapat tiga teknik akuisisi data dalam GPR yang terdiri dari *Ground-Coupled*, *Air-Coupled*, dan *Borehole*.

1. *Ground-Coupled Measurement*

a. *Fixed T/R Offset Mode Continuous (FO)*

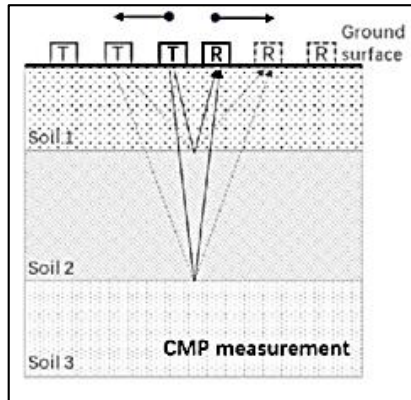
Pada Metode ini operator mengumpulkan data radar secara terus menerus dengan menggunakan jarak antar antenna tetap konstan yaitu *transmitter* dan *receiver* dipindahkan secara bersamaan di sepanjang jalur survei (Liu et al., 2017).



Gambar 1. *Fixed Offset Profiling* (Liu et al., 2017)

b. *Common Mid-Point (CMP)*

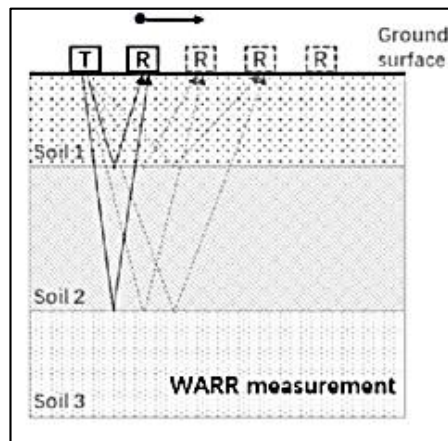
Survey common mid-point digunakan untuk memperkirakan kecepatan sinyal radar terhadap kedalaman tanah dengan cara memvariasikan jarak antar antena dan mengukur perubahan *two-way travel time*. (Jol, 2007).



Gambar 2. *Common mid-point sounding* (Liu et al., 2017)

Pengukuran CMP dilakukan dengan meningkatkan jarak antara pemancar dan penerima secara bertahap dengan tetap mempertahankan titik tengah yang sama (Liu et al., 2017).

c. *Wide-angle reflection and refraction*



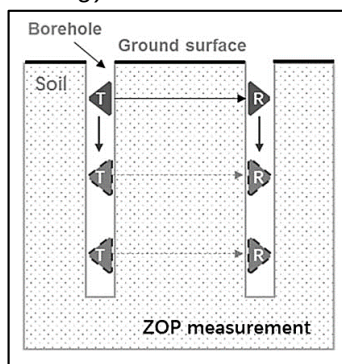
Gambar 3. *Wide-angle reflection and refraction* (Liu et al., 2017)

Pengukuran WARR dilakukan dengan meningkatkan jarak antara *transmitter* dan *receiver* secara bertahap sambil menjaga *transmitter* dalam posisi tetap untuk memperoleh data GPR (Liu et al., 2017).

2. Borehole Measurement

Pengukuran borehole GPR terdiri dari tiga jenis teknik survei utama: ZOP (Zero-Offset Profiling), MOP (Multi-Offset Profiling), dan VRP (Vertical Radar Profiling) (Liu et al., 2017).

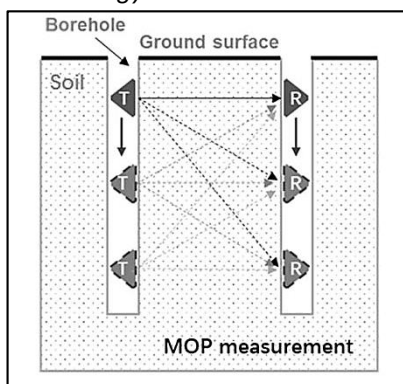
a. ZOP (Zero-Offset Profiling)



Gambar 1.1 Zero-Offset Profiling (Liu et al., 2017)

Dalam pengukuran ZOP, profil kecepatan rata-rata dihitung berdasarkan waktu kedatangan gelombang langsung dan jarak yang diketahui antara dua *borehole* (Liu et al., 2017).

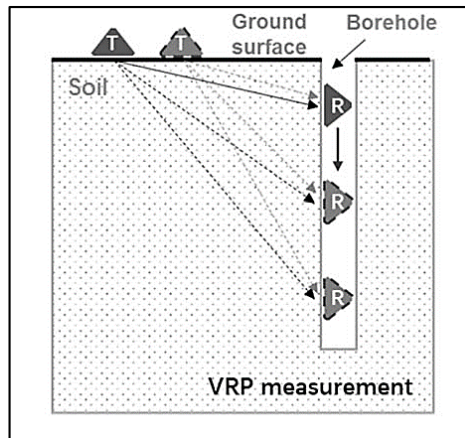
b. MOP (Multi-Offset Profiling)



Gambar 4. Multi-Offset Profiling (Liu et al., 2017)

Pengukuran MOP menghasilkan gambar tomografi 2D dari distribusi kecepatan dengan menganalisis waktu kedatangan gelombang langsung dari semua pengukuran multi-offset (Liu et al., 2017).

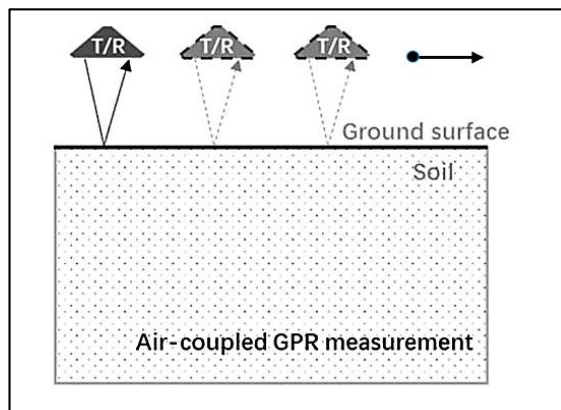
c. VRP (Vertical Radar Profiling)



Gambar 5. *Vertical Radar Profiling* (Liu et al., 2017)

Dalam pengukuran VRP, waktu kedatangan gelombang langsung dan posisi antenna digunakan untuk menentukan kecepatan interval dengan kedalaman ke borehole (Liu et al., 2017).

d. *Air Coupled Measurement*

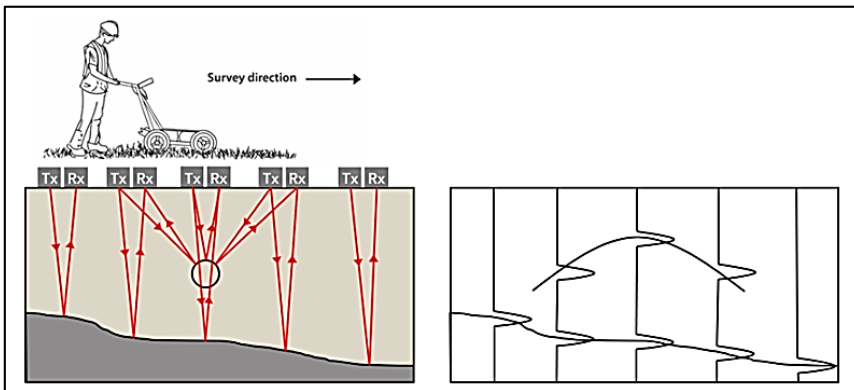


Gambar 6. *Air Coupled Measurement* (Liu et al., 2017)

Antena ditempatkan di atas permukaan tanah, biasanya beberapa sentimeter hingga meter di atas tanah. Teknik ini memungkinkan survei yang lebih cepat dan lebih efisien di area yang luas, meskipun dengan kedalaman penetrasi yang lebih dangkal dibandingkan ground-coupled GPR.

I.8 Resolusi Horizontal

Resolusi horizontal adalah jarak antara dua transmisi yang berdekatan. Berbagai target bawah permukaan menunjukkan karakteristik yang berbeda pada penampang *radargram*. Misalnya, struktur tanah lapisan horizontal ditandai dengan kurva dengan bentuk yang mirip dengan antarmuka, sedangkan objek silinder seperti pipa bawah tanah ditandai dengan hiperbola (Zhu & Ye, 2023).



Gambar 7. Prinsip Resolusi Horizontal Dalam Metode GPR

I.9 Utilitas Bawah Permukaan

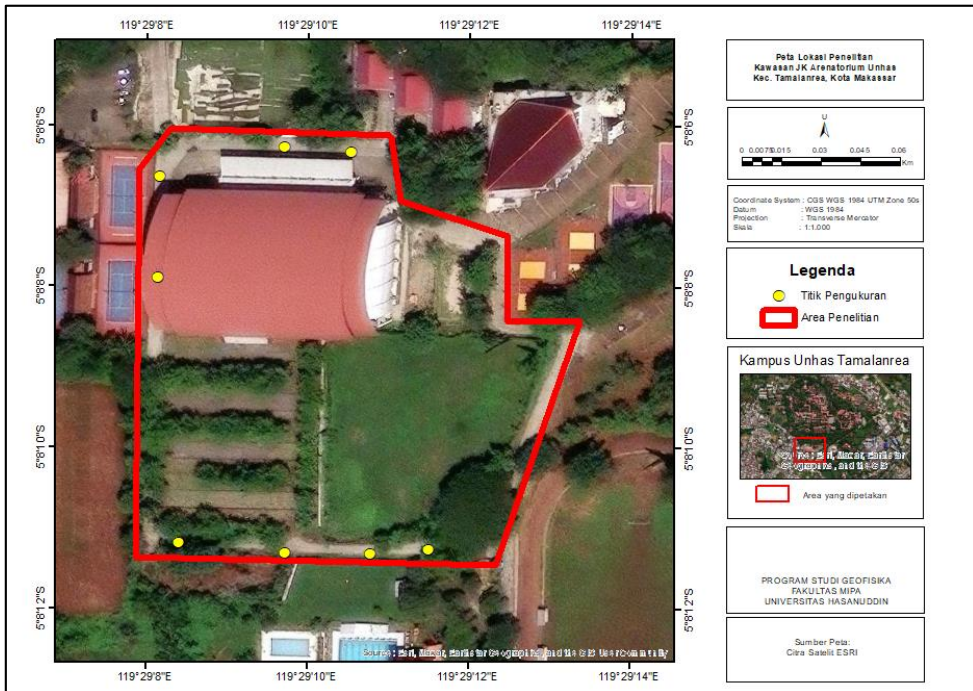
Deteksi utilitas adalah proses identifikasi dan penentuan posisi serta kedalaman benda buatan manusia yang terkubur di dalam tanah, seperti saluran listrik, air, dan gas. Tujuan utama adalah identifikasi target dan pengukuran tepat dari posisinya dan kedalaman (GSSI, 2016).

Pendeteksian utilitas sering menggunakan GPR (GPR) untuk memetakan lokasi benda-benda tersebut tanpa perlu penggalian fisik yang dapat merusak infrastruktur yang ada. Dengan deteksi utilitas yang akurat, risiko kerusakan pada infrastruktur bawah tanah dapat dikurangi, serta memastikan keberlanjutan proyek konstruksi atau penggalian tanah dengan aman (Gandadipoera, 2021).

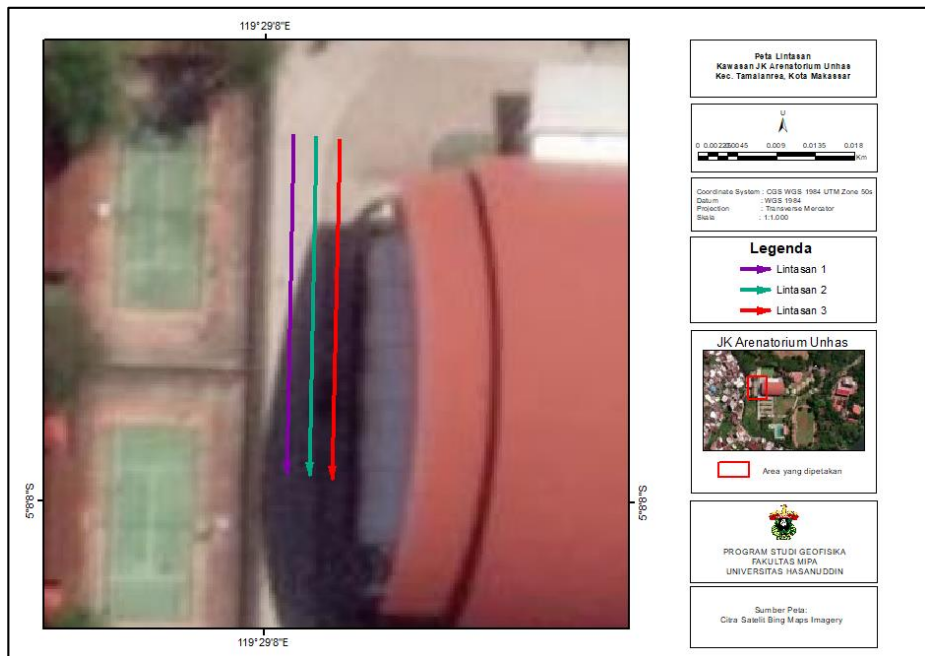
BAB II METODOLOGI PENELITIAN

II.1 Lokasi Penelitian

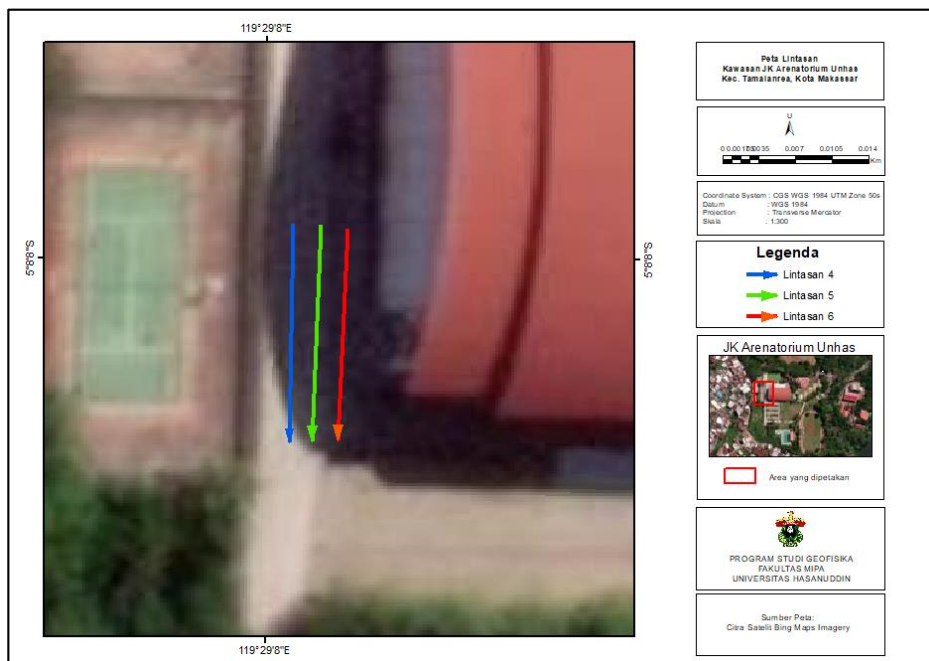
Penelitian ini dilaksanakan di kawasan JK Arenatorium Universitas Hasanuddin, Makassar, Sulawesi Selatan. Lintasan dibuat dengan 3 lintasan saling paralel yang memiliki jarak pemisah ± 1 meter.



Gambar 8. Peta Lokasi Penelitian



Gambar 9. Peta Lintasan 1, 2, dan 3



Gambar 10. Peta Lintasan 4, 5, dan 6



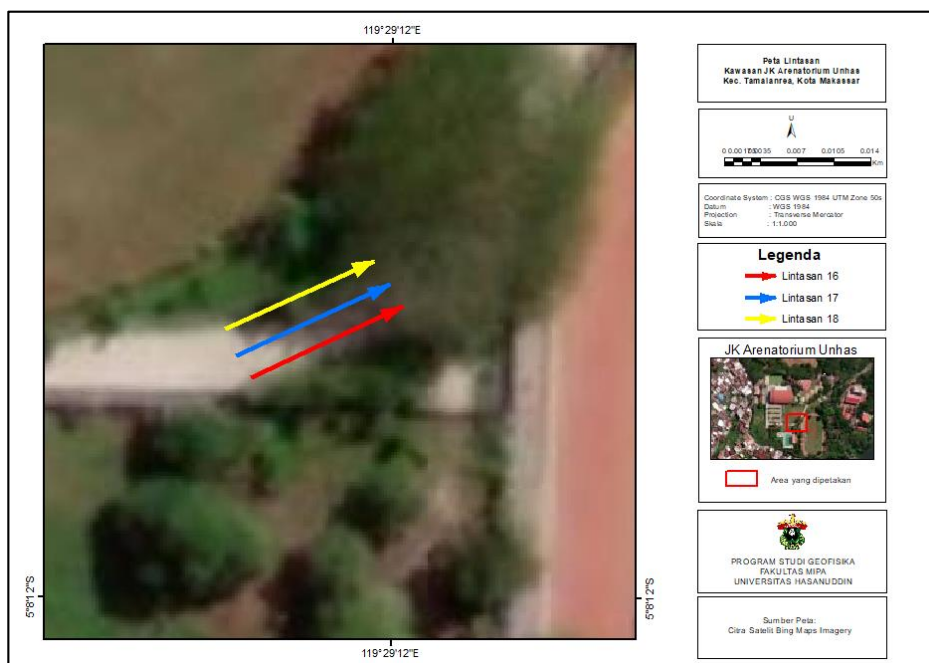
Gambar 11. Peta Lintasan 7, 8, dan 9



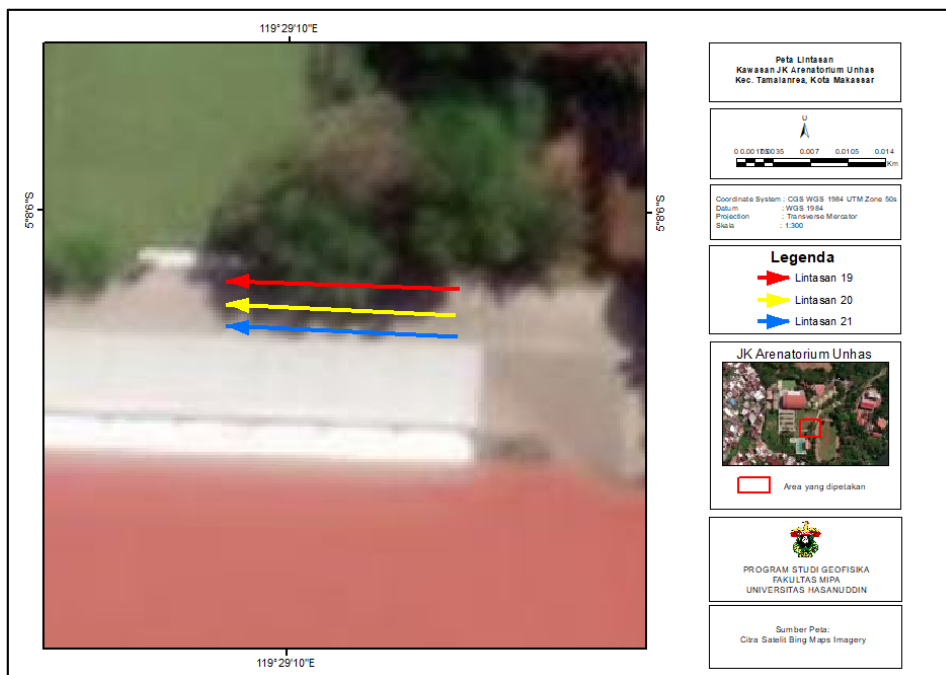
Gambar 12. Peta Lintasan 10, 11, dan 12



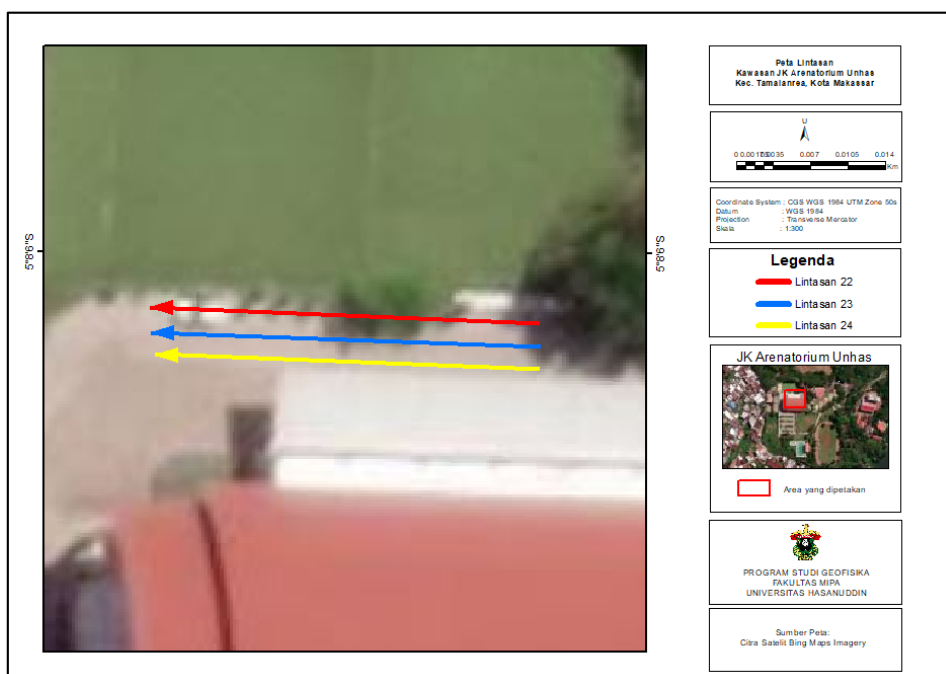
Gambar 13. Peta Lintasan 13, 14, dan 15



Gambar 14. Peta Lintasan 16, 17, dan 18



Gambar 15. Peta Lintasan 19, 20, dan 21



Gambar 16. Peta Lintasan 21, 22, dan 23

II.2 Instrumen Penelitian

Dalam penelitian ini yang digunakan dalam tahap akuisisi data serta pengolahan data, sebagai berikut:

1. Tahap Akuisisi Data:
 - a. 1 set GPR *Geopro* 10
 - b. Antena frekuensi 200 MHz
 - c. 1 set Laptop
2. Tahap Pengolahan Data:
 - a. Software *Geopro Projector*
 - b. 1 set Laptop

II.3 Prosedur Akuisisi Data

Adapun prosedur akuisisi data pada penelitian ini menggunakan metode adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pembuatan desain survey akuisisi data sebagai persiapan pengukuran.
2. Melakukan persiapan pengukuran dengan pemberian tanda dari desain survey yang telah di buat dengan menentukan arah dan panjang lintasan.
3. Lalu mengambil data/ akuisisi di lapangan yang hasilnya berupa radargram.
4. Melakukan marking setiap 1 meter dengan tujuan data yang dapat dinormalisasi saat pengolahan data
5. Data radargram berupa *raw* data akan dilakukan *Quality Data Control* Data GPR untuk penyeleksian data yang baik dan buruk. Data yang kurang baik akan dilakukan pengambilan kembali sedangkan data yang baik akan lanjut ke pengolahan data.

II.4 Prosedur Pengolahan Data

Adapun prosedur pengolahan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

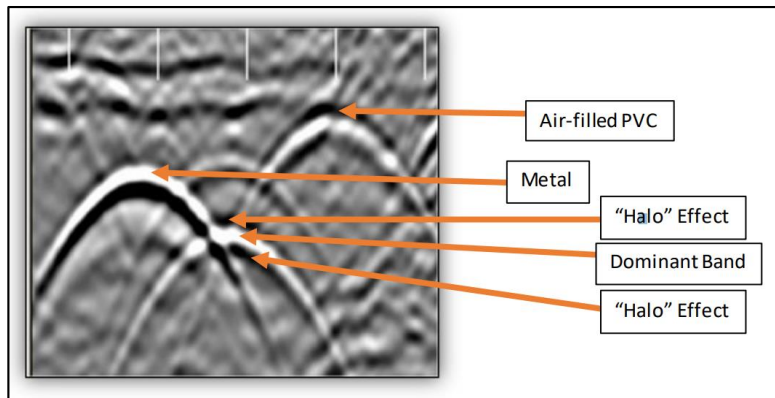
1. *Zero Point Adjust*, langkah ini bertujuan untuk menghilangkan bias awal sehingga sinyal refleksi dari permukaan tanah berada pada titik nol pada skala waktu rekaman. Hal ini dikarenakan sinyal awal yang diterima oleh alat GPR saat dinyalakan tidak berada pada titik nol yang diharapkan.
2. *Dewow*, langkah ini bertujuan untuk menghilangkan frekuensi rendah akibat adanya induksi gelombang elektromagnetik yang terekam sehingga menjadi noise.

3. *Gain Adjust*, langkah ini bertujuan untuk memperjelas sinyal yang lemah karena adanya efek atenuasi ketika gelombang menjalar ke dalam permukaan bumi. Tahap ini perlu diperhatikan dengan seksama pada saat memasukan nilai gain agar amplitudo sinyal dekat permukaan sama besar dengan sinyal yang berada pada kedalaman yang lebih dalam.
4. *Digital Filter*, langkah ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas sinyal dengan mengurangi noise, memperbaiki resolusi, dan memperjelas fitur penting dalam data *radargram*.
5. *Background Remove*, langkah ini bertujuan menghilangkan noise yang tidak beraturan tetapi muncul secara konsisten pada *radargram*.
6. Normalisasi Data, langkah ini bertujuan menyesuaikan jarak di dalam data *radargram* dan jarak aktual di lapangan, dengan memberikan jumlah *scan* yang sama dalam jarak tertentu.
7. *Velocity Estimation*, langkah ini bertujuan untuk menghitung kecepatan penalaran gelombang elektromagnetik berdasarkan karakteristik hiperbola pada *radargram*.
8. Estimasi Posisi Target, langkah ini dilakukan dengan tujuan menentukan jarak dan kedalaman target pada *radargram*.

II.5 Interpretasi Data

Perbedaan konduktivitas elektrik antar material yang di-*scan* akan mempengaruhi kontras kecerahan refleksi. Karena nilai konduktivitas tinggi, bahan metal akan menunjukkan refleksi yang sangat cerah. Metal akan mengembalikan lebih banyak sinyal daripada yang dibebankan. Sedangkan Target non-metal, yang kurang konduktif, hanya akan mengembalikan energi ter-refleksi. Tidak peduli seberapa tipis aluminium foil, tetap berfungsi sebagai reflektor energi radar pada metal. Meskipun refleksi metal dapat dilihat dengan jelas, target di bawahnya akan lebih sulit untuk dilihat (GSSI, 2016).

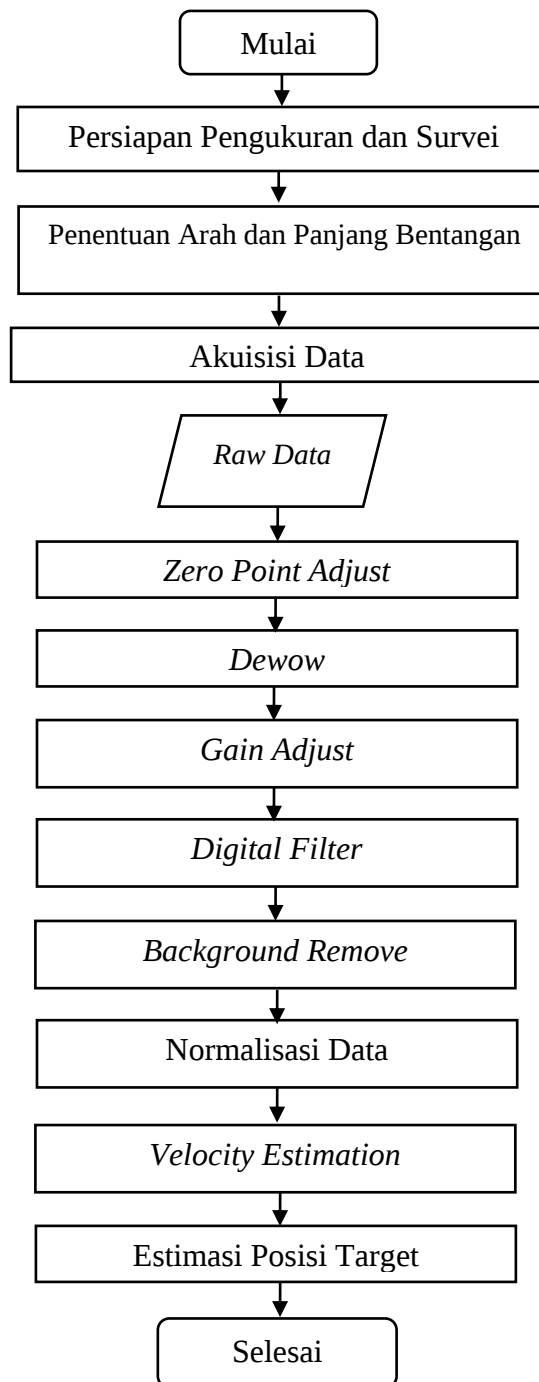
II.5.1 Polarisasi Refleksi



Gambar 17. Polarisasi Refleksi target metal dan PVC (GSSI, 2016)

Dalam interpretasi data GPR, polarisasi refleksi (*reflection polarity*) merujuk pada arah perubahan amplitudo gelombang elektromagnetik yang terpantul dan diterima oleh receiver. Perubahan ini direpresentasikan dalam dua bentuk, yaitu positif dan negatif, yang divisualisasikan sebagai warna putih dan hitam pada radargram. Warna dominan ini ditentukan oleh band pertama yang paling terlihat pada pola hiperbola. Jika refleksi yang diterima didominasi oleh nilai negatif (hitam), ini menunjukkan bahwa gelombang radar mengalami percepatan setelah memantul. Pola ini umumnya mengindikasikan keberadaan anomali utilitas, seperti pipa PVC kosong atau pipa yang hanya berisi udara. Sebaliknya, jika refleksi didominasi oleh nilai positif (putih), ini menandakan bahwa gelombang radar melambat karena mengalami pelemahan. Pola ini biasanya mengindikasikan keberadaan pipa logam atau material lain yang cenderung menyerap energi gelombang elektromagnetik (GSSI, 2016).

II.6 Bagan Alir Penelitian



Gambar 18. Bagan Air Penelitian