

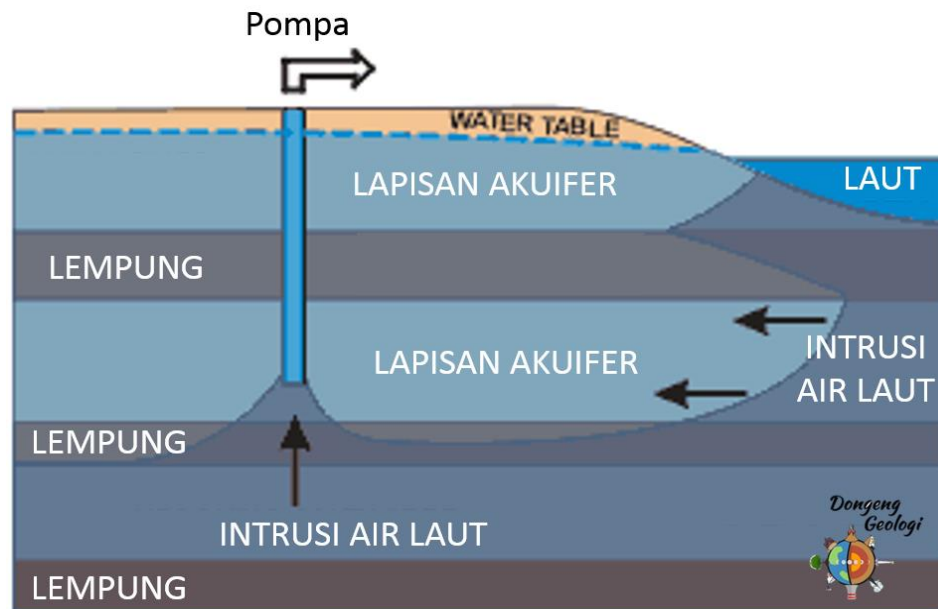
BAB II

DASAR TEORI

1.1 Intrusi Air Laut

Akuifer di daerah pantai merupakan sumber utama air tanah utama masyarakat, digunakan untuk keperluan sehari-hari. Akuifer di daerah pantai rawan dengan risiko penyusupan air laut yang dapat mengubah air tanah menjadi payau. Air laut dan air tanah memiliki densitas yang berbeda, jika kedua fluida ini bercampur pada suatu zona dan air tanah akan berubah secara bertahap menjadi air laut. Pada umumnya terdapat *interface* antara air tanah dan air laut sehingga keduanya tidak saling kontak satu dengan lainnya. Akan tetapi, meskipun terdapat *interface* antara air tanah dan air laut seringkali terjadi pengaruh air laut terhadap air tanah secara signifikan di daerah pesisir, namun pengaruh tersebut berbeda pada setiap daerah pesisir [6].

Eksplorasi air tanah yang terus meningkat menjadi faktor utama yang dapat menimbulkan dampak lingkungan, seperti intrusi air laut, *subsidence*, dan amblesan. Penyebab intrusi air laut kepadatan penduduk penggunaan sumur bor turunnya muka air tanah curah hujan yang rendah letak dan jarak dekat pantai batuan penyusun akuifer. Pengambilan air tanah yang berlebihan akan mengakibatkan akuifer di bawah permukaan akan mengalami penyusutan jumlah air tanah (Gambar 2.1). Pada beberapa kasus, pengambilan air tanah yang berlebihan mengakibatkan intrusi air laut. Intrusi air laut menimbulkan air sumur masyarakat berubah menjadi payau. Air sumur payau tentunya akan mengakibatkan dampak negatif bagi masyarakat, seperti gangguan kesehatan, penurunan kesuburan tanah, kerusakan bangunan, dan gejala lainnya [6]. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengelolaan sumber daya air tanah yang baik sehingga tidak menimbulkan kerugian bagi kehidupan dan penghidupan manusia. Salah satu langkah yang dapat dilakukan adalah dengan mengenali daerah yang terkena dampak intrusi air laut dengan menggunakan metode geofisika yaitu *ground penetrating radar* (GPR).



Gambar 2.1 Terjadinya intrusi air laut [6].

Pemanfaatan metode GPR dalam identifikasi zona air tanah yang terkontaminasi oleh air laut telah banyak dilakukan dalam berbagai penelitian. Penelitian tentang intrusi air laut di daerah pesisir Bourkom menyebutkan bahwa sinyal GPR yang melewati daerah terkontaminasi air laut mengalami atenuasi gelombang yang signifikan [7]. Penelitian yang mengkombinasikan metode ERT dan GPR untuk mengidentifikasi intrusi air laut di daerah pesisir Selatan India menyebutkan bahwa sinyal gelombang GPR yang melalui daerah dengan konstanta dielektrik tinggi mengalami atenuasi gelombang [8]. Zona yang memiliki konstanta dielektrik tinggi dapat diidentifikasi mengandung intrusi air laut. Amplitudo gelombang radar GPR pada zona air asin memiliki nilai yang sangat kecil.

1.2 Salinitas

Salinitas didefinisikan sebagai padatan garam yang terlarut dalam satu kilogram air laut di mana semua brom dan yodium diganti oleh klor dalam jumlah yang sama semua karbonat diubah menjadi oksida dan semua zat organik berubah menjadi oksida. Nilai salinitas dinyatakan dalam (%). Pengukuran salinitas dapat dilakukan menggunakan alat bantu misalnya Refractometer atau alat lainnya. Salinitas adalah

bagian dari sifat fisika dan kimia dari air, selain suhu, substrat, pH, dan unsur lainnya [9]. Pada umumnya tinggi rendahnya salinitas dipengaruhi oleh senyawa atau unsur kimia yang dikandung, seperti natrium (Na), klorida (Cl), kalsium (Ca), magnesium (Mg), sulfat (SO₄), kalium (K), dan bikarbonat (HCO₃). Analisis tingkat salinitas dapat menggunakan klasifikasi salinitas ditunjukkan Tabel 2.1 [10] dan standar klasifikasi zona konservasi tanah yang aman atau tidak aman Tabel 2.2 [10]. Pada air tawar, kandungan garam kurang dari 0,05 % jika lebih dari itu dikategorikan sebagai air payau. Terdapat beberapa kondisi air laut memiliki kadar garam yang lebih tinggi bisa mencapai 30 %, misalnya Laut Mati. Pada dasarnya lapisan batuan atau tanah yang memiliki kandungan salinitas tinggi rawan terhadap intrusi air laut [11]. Hal ini dapat mempengaruhi kualitas air tanah di bawah permukaan.

Tabel 2.1 Klasifikasi salinitas [9].

Salinitas (%)	Klasifikasi
<0,5	Fresh water
0,5-3,0	Oligohaline
3,0-16,0	Mesohaline
16,0-30,0	Polyhaline
30,0-40,0	Marine

Tabel 2.2 Klasifikasi Zona Konservasi Air tanah berdasarkan pertimbangan penurunan kualitas air tanah [10]

No	Zona	Keterangan
1	Aman	Kenaikan salinitas < 1000 mg/l
2	Rawan	Kenaikan salinitas antara 1000-10000 mg/l

3	Kritis	Kenaikan salinitas antara > 10000-15000 mg/l
4	Rusak	Kenaikan salinitas > 100000 mg/l

Faktor-faktor yang mempengaruhi salinitas yaitu :

1. Penguapan, daerah dengan tingkat penguapan air laut yang tinggi akan menghasilkan daerah tersebut memiliki salinitas yang tinggi, dan sebaliknya jika daerah dengan tingkat penguapan yang rendah akan menghasilkan salinitas yang rendah.
2. Curah hujan, daerah dengan intensitas curah hujan yang tinggi mengakibatkan salinitas pada daerah tersebut rendah, dan sebaliknya jika curah hujan disuatu wilayah rendah maka salinitas pada daerah tersebut akan tinggi.
3. Aliran sungai yang banyak bermuara di daerah laut akan mengakibatkan salinitas yang rendah pada wilayah tersebut.

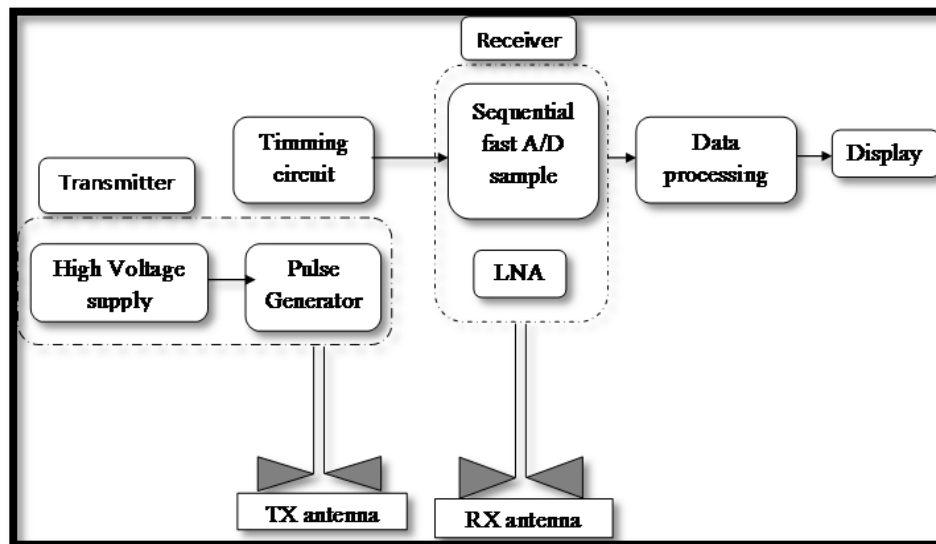
Salinitas yang tinggi cenderung memiliki konstanta dielektrik material yang tinggi, sehingga hubungan antara salinitas terhadap atenuasi gelombang radar berbanding terbalik. Hal ini disebabkan oleh penyerapan energi yang tinggi oleh material terhadap sinyal yang ditransmisikan. Pada material dengan kandungan salinitas yang tinggi menyebabkan atenuasi gelombang radar yang tinggi, sehingga amplitudo yang terekam pada *radargram* kecil.

1.3 **Ground Penetrating Radar (GPR)**

Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) merupakan salah satu metode geofisika yang mempelajari kondisi bawah permukaan bumi dengan menggunakan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi antara 1 MHz-1000 MHz. Gelombang elektromagnetik akan dipancarkan ke dalam bumi untuk mendeteksi permitivitas listrik, konduktivitas, dan permeabilitas medium yang dilewati oleh pulsa elektromagnetik. Metode GPR dapat menghasilkan citra bawah permukaan bumi

dengan resolusi yang tinggi, khususnya untuk survei dangkal dan sifatnya non-destruktif (tidak merusak) daerah akuisisi, karena tidak melakukan penggalian terhadap tanah [12]. Penggunaan metode dapat dilakukan untuk berbagai kepentingan, termasuk stratigrafi tanah, studi air tanah, pemetaan *fracture bedrock*, dan penentuan kedalaman dari permukaan air tanah [1].

Gambar 2.2 merupakan gambaran dari komponen penyusun sistem GPR. Sistem GPR untuk melakukan pengukuran citra bawah permukaan terdiri atas *control unit*, antenna pengirim dan antenna penerima, penyimpanan data, dan peralatan *display*. Kontrol unit radar menghasilkan pulsa *trigger* tersinkronisasi ke pengirim dan penerima di antenna. Selama pengukuran pulsa ini berfungsi untuk mengendalikan pengirim dan penerima, kemudian menghasilkan gelombang dari radar yang direfleksikan [13]. Jarak antenna dengan permukaan tanah akan mempengaruhi data hasil pengukuran yang diperoleh. Jenis tanah yang berbeda-beda pada setiap lokasi pengukuran menjadi indikator dalam penentuan *interface* antenna dengan permukaan. Jarak antenna dengan permukaan ditunjukkan pada Tabel 2.3.



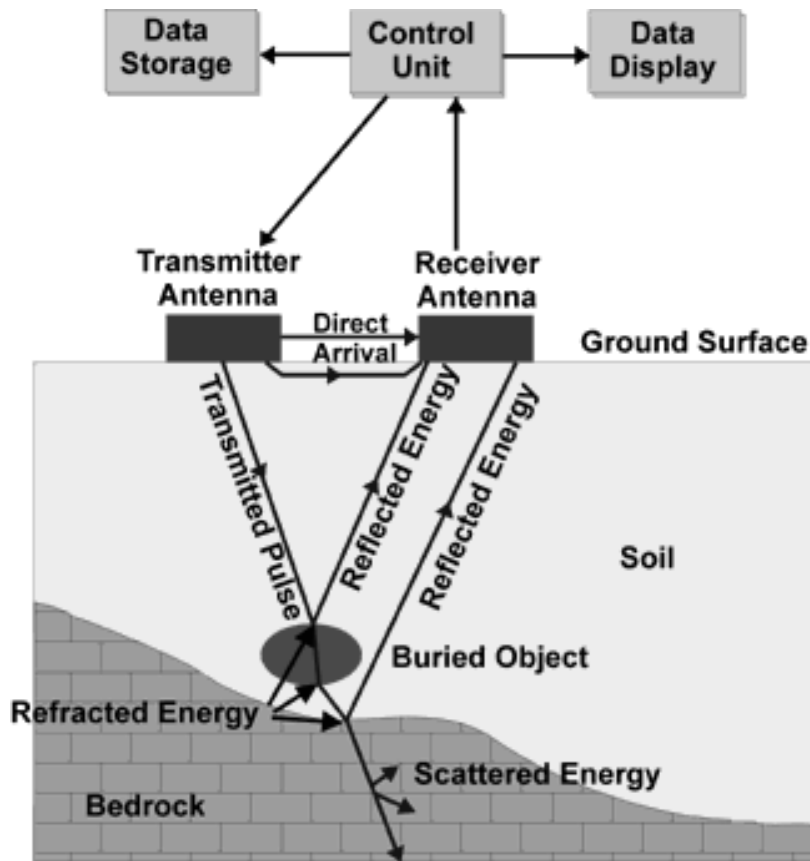
Gambar 2.2 Sistem GPR [14].

Tabel 2.3 Penentuan *interface* antena dengan permukaan [2].

Permitivitas Jenis tanah (ϵ_{r1})	Jarak antena ke tanah (cm)		
	f = 200 MHz	f = 600 MHz	f = 1 GHz
4	18.35	6.1	0.61
9	14.97	4.99	0.99
16	12.95	4.32	0.86
25	11.69	3.86	0.77
30	11.07	3.69	0.74

1.3.1 Prinsip Dasar *Ground Penetrating Radar* (GPR)

Metode GPR memanfaatkan pemantulan gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh medium (*reflector*) dari bawah permukaan bumi. Gelombang elektromagnetik yang ditransmisikan ke medium, kemudian akan dipantulkan kembali ke permukaan bumi dan diterima oleh alat penerima radar (*receiver*), dari hasil pemantulan tersebut dapat dideteksi berbagai objek di bawah permukaan bumi. Mekanisme kerja GPR [2] ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Mekanisme kerja GPR [15].

Untuk mendeteksi objek dibutuhkan perbedaan sifat kelistrikan dari medium yang dilewati gelombang radar. Sifat kelistrikan tersebut antara lain permitivitas listrik, konduktivitas, dan permeabilitas magnetik. Kecepatan gelombang radar pada medium bergantung pada kecepatan cahaya dalam ruang hampa ($c=0.3 \text{ m/ns}$), konstanta dielektrik relatif medium (ϵ_r), dan permeabilitas magnetik relatif (μ_r) [2].

Prinsip dasar gelombang elektromagnetik didasarkan pada persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell mempunyai empat persamaan medan. Persamaan Maxwell I, persamaan yang menyatakan bahwa medan listrik merupakan hasil dari perubahan medan induksi magnet :

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1)$$

Persamaan Maxwell II, persamaan yang menyatakan bahwa medan magnet dihasilkan dari aliran arus listrik :

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.2)$$

Persamaan Maxwell III, persamaan yang menyatakan bahwa sifat *loop* tertutup perpindahan listrik berlaku pada suatu rapat muatan listrik :

$$\nabla \cdot D = q \quad (2.3)$$

Persamaan Maxwell IV, merupakan persamaan yang menyatakan bahwa sifat *loop* tertutup untuk induksi magnet berlaku jika tidak terdapat arus magnet bebas :

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.4)$$

Dari persamaan Maxwell di atas dapat diperoleh kecepatan gelombang radar pada medium, kecepatan ini bergantung pada kecepatan cahaya (c), konstanta relatif dielektrik (ϵ_r) , dan permeabilitas magnetik (μ_r). Persamaan kecepatan gelombang elektromagnetik pada suatu medium adalah [2] :

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\left\{\left(\frac{\epsilon_r \mu_r}{2}\right)(1+P^2)+1\right\}}} \quad (2.5)$$

Keterangan :

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

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} m/ns \quad (2.6)$$

Radiasi elektromagnetik yang dipantulkan bergantung pada besar konstanta dielektrik relatif medium yang berdekatan. Radiasi pantulan dengan kontras (amplitudo) besar, maka jumlah besar energi yang dipantulkan juga besar. Nilai refleksi gelombang disebut koefisien refleksi (R). koefisien refleksi merupakan perbandingan energi yang dipantulkan dan energi yang ditransmisikan. Besar R ditentukan oleh konstanta dielektrik relatif medium dengan rentang nilai ± 1 . Bagian energi yang

ditransmisikan sama dengan $1-R$, dan magnitudo koefisien refleksi sama dengan R^2 [16].

Amplitudo koefisien refleksi dituliskan seperti persamaan berikut:

$$R = \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} = \frac{(\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}})}{(\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}})} \quad (2.7)$$

Dengan V_1 dan V_2 adalah kecepatan gelombang pada medium pertama dan medium kedua ($V_1 < V_2$) dan ϵ_{r1} , ϵ_{r2} merupakan konstanta dielektrik relatif dari lapisan 1 dan lapisan 2 [16].

1.3.2 Atenuasi gelombang

Dalam perambatannya, amplitudo dari sinyal akan mengalami penurunan karena akibat dari adanya energi yang hilang. Hilangnya energi diakibatkan oleh terjadinya pemantulan ataupun transmisi gelombang saat melewati batas antar medium. Faktor penyebab hilangnya energi adalah perubahan energi elektromagnetik menjadi energi panas. Peristiwa hilangnya energi disebut dengan istilah absorpsi (energi elektromagnetik menjadi energi panas) gelombang elektromagnetik oleh medium [2]. Atenuasi gelombang terjadi karena adanya sifat dielektrik dan sifat kelistrikan medium yang dilewati oleh gelombang radar. Atenuasi gelombang elektromagnetik dipengaruhi oleh konduktivitas, permitivitas, dan permeabilitas magnetik medium, di mana gelombang tersebut menjalar, serta frekuensi sinyal itu sendiri. Koefisien atenuasi ditentukan dengan persamaan berikut [1]:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r \mu_r}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega}\right)^2} - 1} \quad (2.8)$$

Atenuasi gelombang elektromagnetik sangat mempengaruhi kedalaman yang dicapai oleh gelombang radar. Atenuasi gelombang radar dipengaruhi oleh permitivitas relatif, konduktivitas, dan permeabilitas batuan bawah permukaan yang diperlihatkan pada Tabel 2.4. Mengatasi atenuasi dapat dilakukan dengan melakukan perubahan pada parameter saat akuisisi.

Tabel 2.4 Permittivitas relatif, konduktivitas, kecepatan dan atenuasi [17].

Material	Permittivitas relatif	Konduktivitas (mS/m)	Kecepatan (m/ns)	Koef. Atenuasi (db/m)
Udara	1	0	0.3	0
Air distilasi	80	0.01	0.033	2×10^{-3}
Air segar	80	0.5	0.033	0.1
Air laut	80	3×10^3	0.01	10^3
Pasir kering	3-5	0.01	0.15	0.01
Pasir jenuh	20-30	0.1-1	0.08	0.03-0.3
Batugamping	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Serpih	5-15	1-100	0.09	1-100
Lanau	5-30	1-100	0.07	1-100
Lempung	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granit	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Garam kering	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Es	3-4	0.01	0.16	0.01

1.3.3 Skin depth

Skin depth merupakan istilah yang digunakan untuk menjelaskan kedalaman yang dicapai oleh gelombang radar. Kedalaman penetrasi gelombang radar dibatasi oleh konduktivitas yang rendah atau resistivitas yang tinggi dari medium. Kedalaman penetrasi (*skin depth*) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [1] :

$$\delta = \frac{1}{\sigma} = \frac{c}{\omega \sqrt{\frac{\epsilon_r \mu_r}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega}\right)^2} - 1}} \quad (2.9)$$

Pada medium konduktor kedalaman penetrasi bergantung pada besar frekuensi yang digunakan. Semakin kecil frekuensi yang digunakan maka semakin dalam kedalaman penetrasi gelombangnya, sebaliknya jika frekuensi yang digunakan besar maka kedalaman penetrasi gelombangnya akan dangkal. Permittivitas dan konduktivitas listrik pada setiap material memiliki nilai yang berbeda-beda, seperti ditunjukkan pada tabel 4.3. Definisi matematik faktor atenuasi dan *skin depth* dapat dituliskan seperti persamaan berikut [2] :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0}} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.10)$$

Kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik bergantung pada frekuensi antenna yang digunakan, semakin besar frekuensi antenna maka kedalaman penetrasinya dangkal, sedangkan antenna dengan frekuensi yang kecil akan menghasilkan kedalaman penetrasi yang dalam. Menggunakan antenna dengan frekuensi tinggi akan menghasilkan resolusi citra bawah permukaan yang tinggi, sedangkan antenna dengan frekuensi yang rendah menghasilkan resolusi citra bawah permukaan yang rendah pula. Kedalaman penetrasi gelombang untuk pada frekuensi antenna ditunjukkan seperti Tabel 2.5 berikut :

Tabel 2.5 Resolusi dan daya tembus gelombang radar [17].

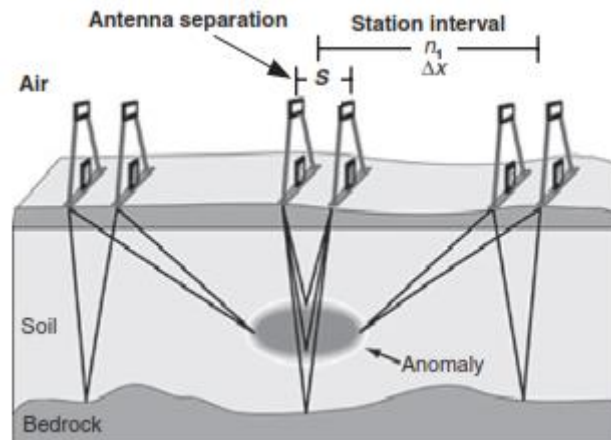
Frekuensi Antenna (Mhz)	Ukuran Target Minimum yang Terdeteksi (m)	Aproksimasi Kedalaman (m)	Penetrasi Kedalaman Maksimum (m)
25	≥ 1.0	5-30	35-60
50	≥ 0.5	5-20	20-30
100	0.1-1.0	5-15	15-25
200	0.05-0.50	1-10	5-15
400	≈ 0.05	1-5	3-10
1000	0.01	0.05-2	0.5-4

1.3.4 Tipe Akuisisi Data

Terdapat tiga konfigurasi dalam akuisisi GPR, yaitu *continuous reflection profiling*, *velocity sounding* (CRP), *common midpoint* (CMP), dan *radar tomography* [2].

A. Continuous Reflection Profiling (CRP)

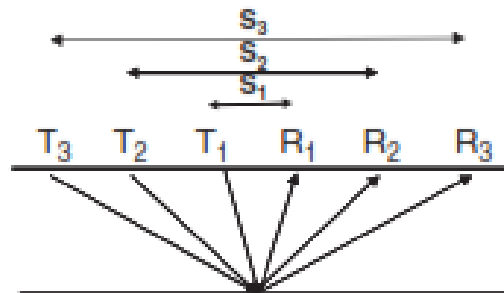
Konfigurasi CRP disebut juga sebagai refleksi merupakan konfigurasi yang paling umum digunakan. Posisi antena penerima dan pemancar berada pada jarak tertentu dan dipindahkan sepanjang lintasan pengukuran. Hasil survei pada *radargram* berupa waktu tempuh gelombang radar pada sumbu vertikal dan jarak tempuh pada sumbu horizontalnya. Proses akuisisi pada konfigurasi ini ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Konfigurasi CRP [2].

B. Common Mid Point (CMP)

Konfigurasi CMP disebut sebagai *velocity sounding* yang menggunakan antena bistatik, di mana *transmitter* dan *receiver* bergerak menjauh disepanjang lintasan akuisisi. Daerah akuisisi metode ini harus berada pada posisi *reflector* yang datar. CMP sering digunakan untuk mengetahui kecepatan pada setiap lapisan pengukuran. Proses akuisisi pada konfigurasi ini ditunjukkan pada Gambar 2.5.

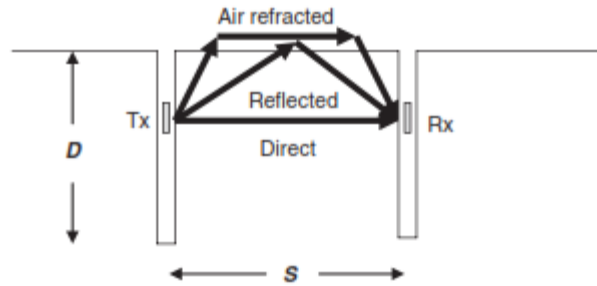


Gambar 2.5 Konfigurasi CMP [2].

C. Transillumination atau Radar Tomography

Konfigurasi ini sering digunakan untuk pengukuran GPR di lubang bor untuk rekayasa dan studi lingkungan [11]. Kedua kasus menggunakan

estimasi v dan α berasal dari waktu tempuh sinyal dan amplitudo pengukurannya. Survei dengan konfigurasi ini membutuhkan informasi *geometry* sebagai data tambahan untuk pengukuran GPR guna memastikan kebenaran interpretasi data. Proses akuisisi pada konfigurasi ini ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Konfigurasi *transillumination* [2].