

Analisis Respons *Ground Penetrating Radar* (GPR) Frekuensi Antena 250 MHz pada Berbagai Medium Permukaan Berdasarkan Pola Refleksi dan Parameter Elektromagnetik

Diva Maharani¹, Risal Noska Nababan¹

¹PT Abhinaya Mappindo Bumitala

ABSTRAK

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan metode geofisika non-destruktif yang memanfaatkan propagasi gelombang elektromagnetik untuk mengidentifikasi karakteristik bawah permukaan. Respons gelombang GPR dipengaruhi oleh sifat elektromagnetik material, terutama permitivitas relatif yang berkaitan dengan kecepatan rambat gelombang. Penelitian ini bertujuan menganalisis respons GPR frekuensi 250 MHz pada tiga medium permukaan, yaitu tanah, aspal, dan beton, serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan teori propagasi gelombang elektromagnetik. Data penelitian terdiri atas 18 radargram yang diperoleh dari enam lokasi pengukuran, dengan masing-masing dua lokasi untuk setiap jenis medium. Analisis dilakukan dengan membandingkan karakteristik radargram, kedalaman penetrasi, dan ketebalan lapisan yang teridentifikasi berdasarkan perbedaan sifat material serta perhitungan kecepatan rambat teoritis. Hasil analisis menunjukkan bahwa variasi medium permukaan berkaitan dengan perbedaan karakteristik respons gelombang dan kedalaman penetrasi yang teramati. Berdasarkan nilai permitivitas relatif asumsi, kecepatan rambat teoritis pada tanah $\epsilon_r = 8$, aspal $\epsilon_r = 10$, dan beton $\epsilon_r = 15$. masing-masing sekitar $0,106 \text{ m/ns}$, $0,095 \text{ m/ns}$, dan $0,077 \text{ m/ns}$. Beton memiliki kecepatan rambat teoritis paling rendah, sedangkan tanah memiliki kecepatan tertinggi. Perbedaan respons aktual juga dapat dipengaruhi oleh heterogenitas material, kadar air, kondisi geologi lokal, dan karakteristik akuisisi. Penelitian ini menegaskan bahwa interpretasi radargram perlu mempertimbangkan sifat elektromagnetik material dan kondisi lapangan agar estimasi kedalaman serta identifikasi lapisan dapat lebih akurat.

Kata kunci: *Ground Penetrating Radar*, permitivitas relatif, medium permukaan, kedalaman penetrasi

I. PENDAHULUAN

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan metode geofisika non-destruktif yang memanfaatkan propagasi gelombang elektromagnetik untuk mengidentifikasi struktur dan objek bawah permukaan. Gelombang elektromagnetik yang dipancarkan antena GPR akan mengalami refleksi, transmisi, dan atenuasi ketika berinteraksi dengan material yang memiliki perbedaan sifat elektromagnetik (López & García-Fernández, 2021). Respons gelombang yang diterima direkam dalam bentuk radargram dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi anomali maupun target bawah permukaan. Karakteristik propagasi gelombang GPR terutama dipengaruhi oleh permitivitas dielektrik dan konduktivitas listrik medium, yang selanjutnya mempengaruhi kecepatan propagasi, atenuasi, dan kemampuan penetrasi gelombang (Yadav et al., 2026).

Kedalaman penetrasi dan karakteristik respons GPR dengan demikian tidak hanya ditentukan oleh frekuensi antenna, tetapi juga oleh sifat medium yang dilalui gelombang.

Pada penerapan GPR di lingkungan terbangun, antenna tidak selalu beroperasi di atas material tanah, tetapi juga dapat digunakan pada permukaan berupa aspal maupun beton yang memiliki karakteristik material berbeda. Oleh sebab itu, diperlukan pengamatan berbasis data lapangan untuk mengetahui bagaimana perbedaan medium permukaan tercermin pada radargram yang diperoleh dengan parameter akuisisi yang sama. Pendekatan tersebut dapat memberikan gambaran empiris mengenai keterkaitan antara karakteristik medium dan respons GPR pada kondisi lapangan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan respons GPR dengan frekuensi antenna tetap sebesar 250 MHz pada tiga medium permukaan, yaitu tanah, aspal, dan beton dalam kondisi relatif kering. Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi dan membandingkan kedalaman amplitudo kuat sebagai reflektor utama yang dapat terlihat pada masing-masing medium. Hasil perbandingan selanjutnya dikaji berdasarkan konsep sifat elektromagnetik medium, khususnya permitivitas dielektrik dan konduktivitas listrik, serta keterkaitannya dengan kecepatan propagasi dan atenuasi gelombang dalam material.

II. BATASAN MASALAH

Guna menjaga penelitian tetap terarah dan membatasi ruang lingkup analisis, ditetapkan batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

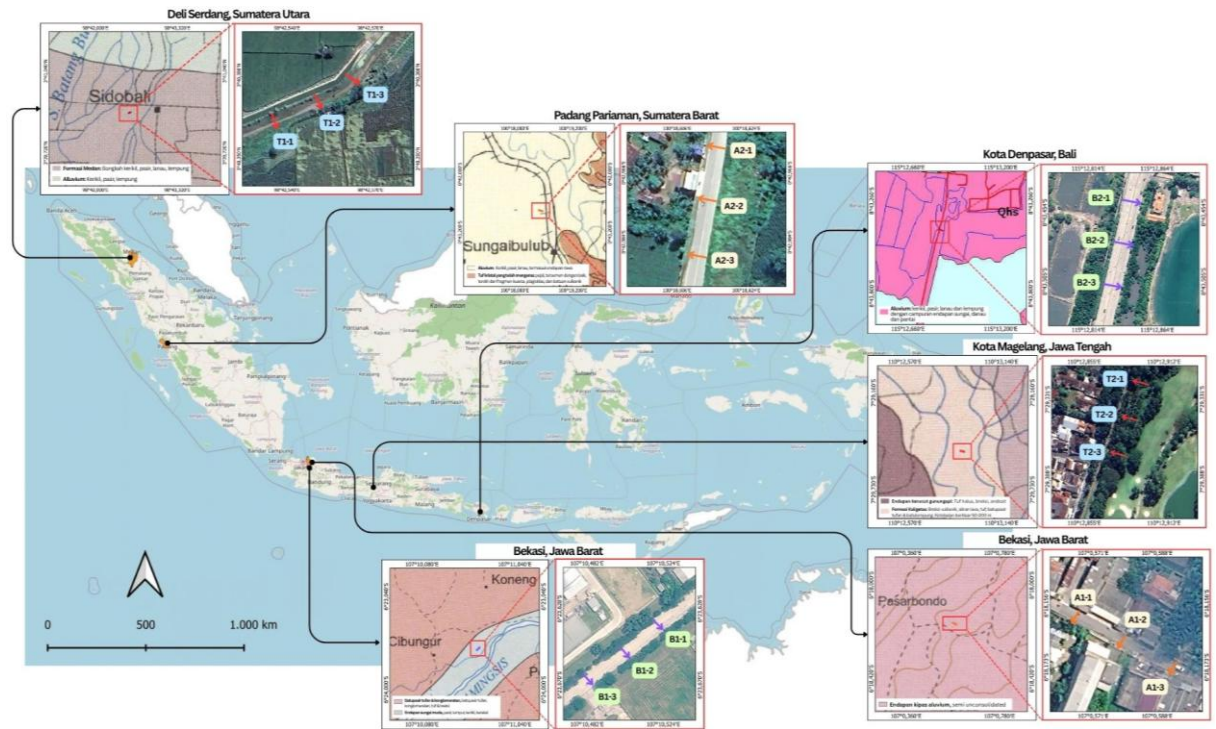
1. Penelitian difokuskan pada analisis respons GPR pada tiga jenis medium permukaan, yaitu tanah, aspal, dan beton pada lokasi yang berbeda.
2. Data yang dianalisis merupakan data GPR dengan frekuensi antenna 250 MHz, sehingga pengaruh perbedaan frekuensi antenna tidak menjadi variabel yang dikaji dalam penelitian ini.
3. Akuisisi data dilakukan pada cuaca cerah, sehingga medium permukaan yang dianalisis berada pada kondisi relatif kering, namun tidak menghilangkan kemungkinan adanya variasi kelembapan pada material bawah permukaan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Area Penelitian

Lokasi pengukuran GPR pada masing-masing medium ditunjukkan pada Gambar 1. Pengukuran dilakukan pada tiga jenis medium permukaan, yaitu tanah, aspal, dan beton pada lingkungan yang berbeda. Analisis dilakukan terhadap dua

lokasi pada setiap medium. Peta lokasi penelitian disusun berdasarkan peta geologi regional yang dimodifikasi dari Thanden et al. (1996), Cameron et al. (1982), Ipranta & Suwijanto (2010), Kastowo et al. (1996), Koesoemadinata & Situmorang (2012). Informasi geologi digunakan sebagai informasi pendukung dalam memahami kondisi geologi regional di sekitar lokasi penelitian, sedangkan analisis utama difokuskan pada perbedaan respons radargram yang diperoleh pada masing-masing medium permukaan.



Gambar 1. Distribusi lokasi akuisisi data GPR pada medium tanah, aspal, dan beton disertai informasi geologi regional

3.2 Data dan Metode

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini berupa radargram dengan frekuensi antenna 250 MHz dan kecepatan propagasi yang digunakan dalam konversi waktu tempuh ke kedalaman sebesar $0,1 \text{ m/ns}$ pada tiga jenis medium permukaan, yaitu tanah, aspal, dan beton. Ketiga medium dipilih karena umum dijumpai pada lingkungan terbangun dan memiliki karakteristik material yang berbeda. Penelitian ini menggunakan 18 radargram dengan detail dalam Tabel 1. Nilai permitivitas relatif atau konstanta dielektrik yang digunakan sebagai parameter pembanding teoritis untuk masing-masing material disajikan pada Tabel 2.

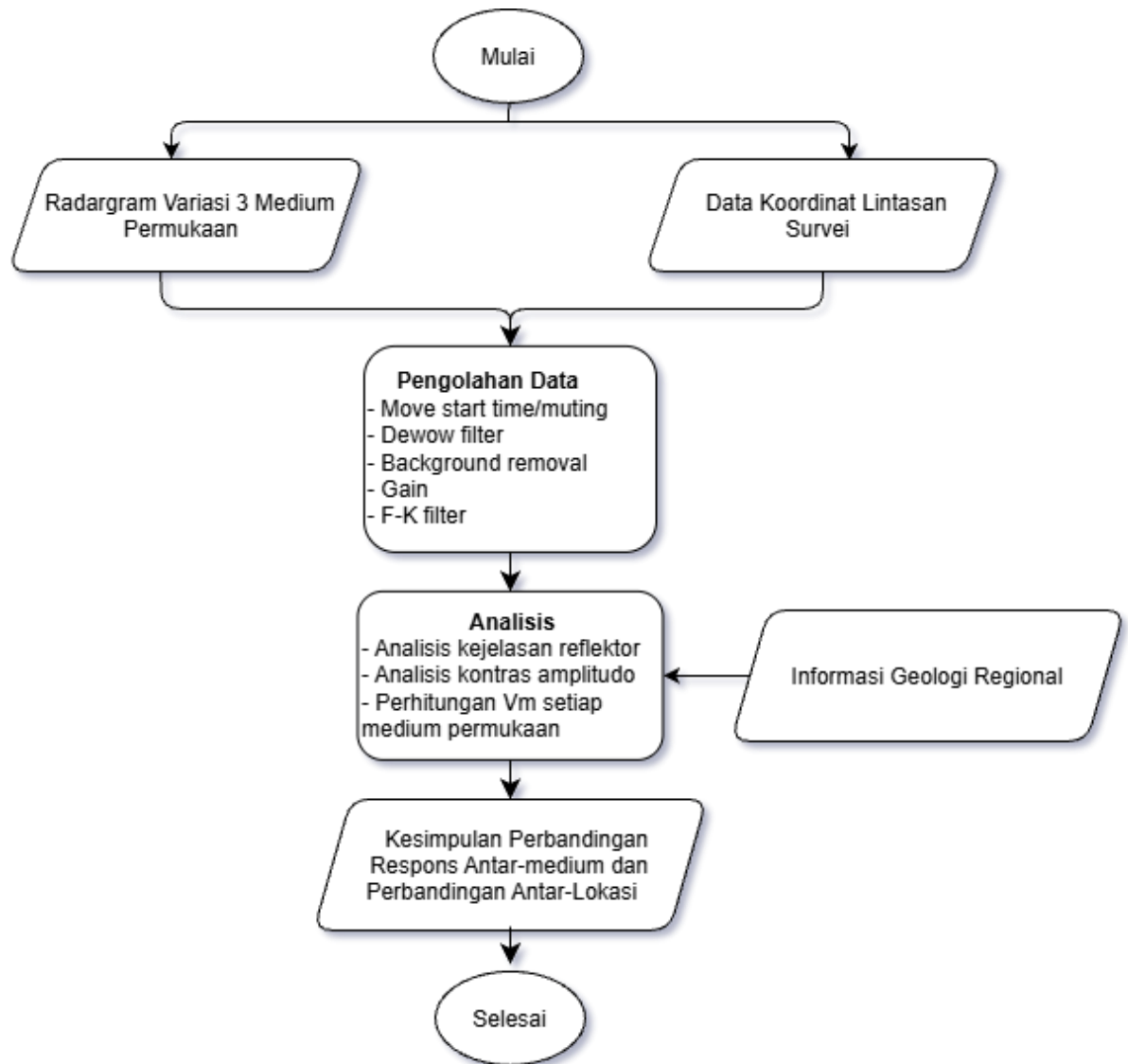
Tabel 1. Detail data radargram

Medium Permukaan	Lokasi	Nama Lintasan	Panjang Lintasan (m)
Tanah	Deli Serdang, Sumatera Utara	T1-1	12,1
		T1-2	8,0
		T1-3	9,5
	Kota Magelang, Jawa Tengah	T2-1	11,2
		T2-2	11,3
		T2-3	12,0
Aspal	Bekasi, Jawa Barat	A1-1	6,8
		A1-2	7,0
		A1-3	7,5
	Padang Pariaman, Sumatera Barat	A2-1	13,6
		A2-2	14,0
		A2-3	11,0
Beton	Bekasi, Jawa Barat	B1-1	24,7
		B1-2	22,0
		B1-3	20,2
	Kota Denpasar, Bali	B2-1	20,4
		B2-2	24,0
		B2-3	22,9

Tabel 2. Nilai permitivitas relatif (Meyer et al., 2008; Reynolds, 2011)

Material	Permitivitas Relatif
Udara	1
Batu bata (kering)	3-5
Batu bata (basah)	5-26
Beton	4-30
Aspal	3-10
Granit	5-7
Lempung (kering)	2-5
Lempung (basah)	8-40
Batupasir (kering)	4-7
Batupasir (basah)	6
Pasir	3-6
Kerikil	5
Kerikil dan pasir (kering)	3,5-6,5
Pasir pantai (kering)	5-10

Pengolahan data radargram dilakukan menggunakan software ReflexW. Tahapan pengolahan diterapkan secara konsisten pada ketiga kelompok medium agar perbedaan respons tidak semata-mata disebabkan oleh perbedaan perlakuan pengolahan data.

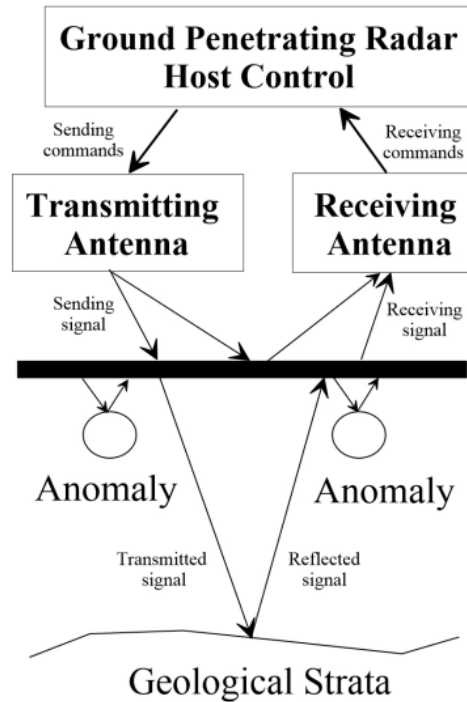


Gambar 2. Diagram alir penelitian

3.4 Ground Penetrating Radar (GPR)

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan salah satu metode geofisika *Non-Destructive Testing* (NDT) yang paling banyak diaplikasikan dalam pemetaan dan deteksi struktur bawah permukaan. Metode ini bekerja dengan memancarkan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi (umumnya antara 100 MHz hingga 2 GHz) ke dalam tanah menggunakan antenna *transmitter* (Tx) dan merekam gelombang yang dipantulkan kembali ke permukaan menggunakan antenna *receiver* (Rx) (Gao & Hu, 2026; Reynolds, 2011; Yadav et al., 2026) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Saat gelombang merambat di bawah permukaan tanah dan melintasi batas antara dua material yang memiliki perbedaan sifat dielektrik (*dielectric permittivity*), sebagian energi gelombang akan dipantulkan kembali ke

permukaan, sementara sisanya terus merambat ke lapisan yang lebih dalam (Syam et al., 2019). Dibandingkan dengan alat *electromagnetic locators* konvensional yang keberhasilannya terbatas pada objek konduktif atau berbahan logam (Gao & Hu, 2026), GPR memiliki keunggulan mendeteksi objek bawah tanah berbahan logam maupun non-logam, seperti pipa plastik/PVC dan kabel serat optik.



Gambar 3. Skema prinsip kerja metode GPR (Xu et al., 2024)

Karakteristik pencitraan beresolusi tinggi menjadikan GPR instrumen utama dalam pemetaan jaringan utilitas perkotaan (*urban subsurface utility mapping*) maupun identifikasi rekahan infrastruktur. Penelitian yang dilakukan oleh Sugiarto et al., (2018), menggunakan metode GPR untuk mengidentifikasi objek bawah permukaan di Kompleks Candi Kedaton, Muarojambi. Studi ini menggunakan antenna frekuensi 200 MHz pada enam lintasan dalam model *grid*. Indikasi objek arkeologi di bawah permukaan ditunjukkan oleh bentukan tinggian-tinggian anomali yang memiliki kedalaman bervariasi dari 1,65 meter hingga 4,50 meter. Selain itu, Lestari et al., (2024), menggunakan metode GPR untuk mengidentifikasi kemenerusan pipa air bawah permukaan di daerah "AYE". Studi dilakukan menggunakan antenna frekuensi 270 MHz pada dua lintasan. Dalam radargram kedua lintasan, ditemukan anomali hiperbola yang sama dan diduga merupakan pipa air.

Pemanfaatan gelombang elektromagnetik terhadap suatu material serta penentuan sifat listrik dan magnetik suatu material, didasarkan atas persamaan Maxwell (Sugiarto et al., 2018; Telford, 1990). Persamaan (3.1) menunjukkan bahwa medan magnetik disebabkan oleh medan listrik. Persamaan (3.2)

menunjukkan bahwa medan listrik dihasilkan dari medan induksi magnetik yang berubah terhadap waktu.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.2)$$

Dengan E merupakan intensitas medan listrik (V/m), H merupakan intensitas medan magnet (A/m), D merupakan pergeseran medan listrik (C/m^2), dan J merupakan rapat arus listrik (A/m^2), dan B merupakan induksi magnetik (T), dengan hubungan $D = \epsilon E$, $B = \mu H$, dan $J = \sigma E$ dimana ϵ merupakan permitivitas material (F/m), μ merupakan permeabilitas material (H/m), dan σ merupakan konduktivitas material (Ω^{-1}/m), persamaan (3.2) menjadi:

$$\nabla \times B = \mu \sigma E + \mu \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.3)$$

Menyelesaikan operasi *curl* dari persamaan (3.1),

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\nabla \times \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) \quad (3.4)$$

Menggunakan vektor identitas,

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E \quad (3.5)$$

Dalam kondisi tanpa muatan atau arus, berlaku $\nabla \cdot E = 0$, sehingga persamaan (3.5) menjadi:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\nabla^2 E \quad (3.6)$$

Substitusi Persamaan (3.3) dan persamaan yang sama berlaku untuk medan magnet,

$$\nabla^2 E = \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

$$\nabla^2 H = \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

Medium bawah permukaan umumnya memiliki sifat non-magnetik ($\mu_r \approx 1$) dan merupakan material dengan konduktivitas yang kecil ($\sigma = 0$) (Reynolds, 2011), maka persamaan kecepatan gelombang dalam material V_m (m/ns) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.9)$$

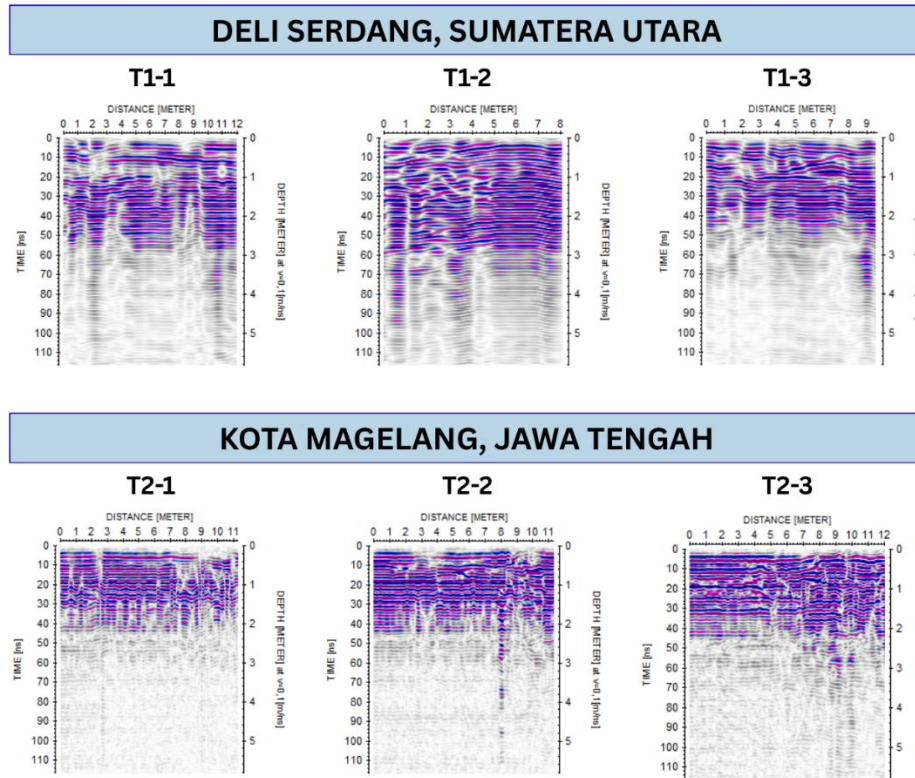
Dengan kecepatan cahaya di ruang hampa $c = 0,3 \text{ } m/ns$ sedangkan ϵ_r adalah permitivitas relatif yang merupakan hasil perbandingan dari permitivitas material

ε dengan permitivitas vakum ε_0 (Reynolds, 2011). Sedangkan untuk menghitung estimasi kedalaman d (meter), digunakan rumus berikut (Yadav et al., 2026):

$$d = \frac{vt}{2} \quad (3.10)$$

IV. HASIL DAN ANALISIS

4.1 Interpretasi Medium Tanah



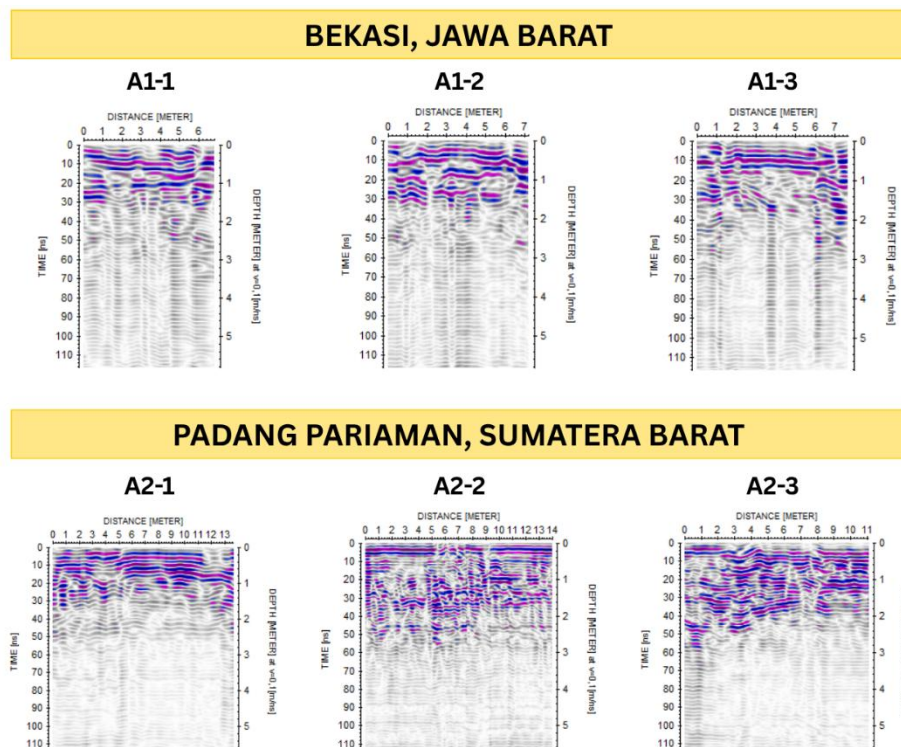
Gambar 4. Hasil radargram pada medium tanah

Pada lokasi Deli Serdang, radargram lintasan T1-1, T1-2, dan T1-3 memperlihatkan reflektor yang relatif menerus pada zona dangkal hingga menengah. Berdasarkan pengamatan visual terhadap ketiga radargram, zona dengan amplitudo masih cukup jelas hingga TWT (*Two-Way Travel Time*) sekitar 45–65 ns, dengan nilai rata-rata sekitar 58 ns. Menggunakan persamaan (3.10) dan kecepatan propagasi gelombang $0,1 \text{ m/ns}$, nilai TWT rata-rata tersebut ekuivalen dengan 2,9 m. Deli Serdang berada pada Formasi Medan yang terdiri atas bongkah, kerikil, pasir, lanau, dan lempung (Cameron et al., 1982). Perbedaan ukuran butir, porositas, densitas, dan kandungan lempung dapat menghasilkan perubahan permitivitas dan konduktivitas secara lateral maupun vertikal (Bobrov et al., 2010; Nurwidyanto et al., 2006). GPR sangat sensitif terhadap kontras permitivitas tersebut sehingga perubahan komposisi sedimen dapat menghasilkan reflektor yang

berbeda. Radargram T1-1 hingga T1-3 dapat diinterpretasikan sebagai respons dari material sedimen heterogen, bukan sebagai satu lapisan homogen. Reflektor yang relatif menerus kemungkinan menunjukkan perubahan material yang cukup konsisten, sedangkan reflektor yang terputus atau mengalami perubahan amplitudo secara lateral kemungkinan terjadi karena bercampurnya material berbutir kasar dan halus.

Radargram T2-1, T2-2, dan T2-3 yang berada di Kota Magelang menunjukkan zona reflektif utama pada TWT sekitar 40–55 ns. Rata-rata batas bawah zona amplitudo kuat diperkirakan sekitar 44 ns yang ekuivalen dengan 2,2 m, lebih dangkal dibandingkan dengan radargram T1-1 hingga T1-3. Berbeda dengan Deli Serdang, lokasi Magelang berada pada lingkungan geologi vulkanik, dengan Formasi Kaligetas yang tersusun atas breksi vulkanik, aliran lava, tuf, batupasir tufan, dan batulempung (Thanden et al., 1996). Pada material vulkanik, heterogenitas litologi bisa menghasilkan *scattering* yang kuat (Bracale et al., 2025). Jadi energi radar tidak hanya "diserap" oleh medium, tetapi juga dapat tersebar akibat kontras elektromagnetik antarfragmen batuan, matriks, rongga, dan material penyusunnya. Sebaliknya, dominasi material klastik berupa pasir dan kerikil di Formasi Medan pada kondisi tertentu dapat menghasilkan atenuasi yang lebih rendah sehingga memungkinkan memiliki kejelasan reflektor yang lebih dalam.

4.2 Interpretasi Medium Aspal



Gambar 5. Hasil radargram pada medium aspal

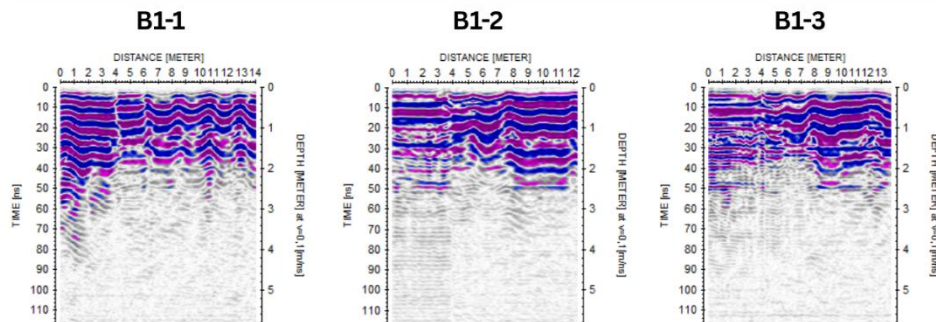
Radargram A1-1, A1-2, dan A1-3 yang berada di Bekasi memperlihatkan amplitudo kuat terutama pada zona dangkal. Zona amplitudo kuat berakhir pada TWT rata-rata 38 ns yang ekuivalen dengan kedalaman 1,9 m kemudian melemah pada waktu yang lebih besar. Dominasi reflektor yang teratur pada zona dangkal dapat diinterpretasikan akibat kontras sifat elektromagnetik di dekat permukaan sangat besar. Aspal memiliki permitivitas dan konduktivitas yang berbeda dengan udara maupun material di bawahnya. Ketika gelombang GPR masuk ke medium, sebagian energi dipantulkan pada batas tersebut. Lintasan A1-1 hingga A1-3 berada pada lingkungan endapan kipas aluvium yang relatif belum terkonsolidasi (Koesoemadinata & Situmorang, 2012). Pelemahan amplitudo pada kedalaman yang lebih besar dapat dipengaruhi oleh keberadaan material halus seperti lanau dan lempung serta saturasi air dalam pori (Tunggulgeni et al., 2026). Material tersebut berpotensi meningkatkan konduktivitas efektif medium sehingga memperbesar atenuasi gelombang elektromagnetik.

Radargram A2-1, A2-2, dan A2-3 memperlihatkan respons yang lebih kompleks. Amplitudo kuat masih terlihat hingga TWT rata-rata sekitar 52 ns ekuivalen dengan kedalaman 2,6 m. Secara visual, radargram A2-1 hingga A2-3 terlihat memiliki pola refleksi *chaotic*. Wilayah Padang Pariaman tersusun oleh kombinasi aluvium, kipas aluvium, tuf batuapung, tuf, andesit/basalt, lahar, dan produk vulkanik lainnya. Endapan aluvium sendiri terdiri atas lanau, pasir, dan kerikil, sedangkan beberapa endapan vulkanik berupa tuf batuapung dan material hasil aktivitas gunung api (Kastowo et al., 1996). Kondisi tersebut memberikan kemungkinan heterogenitas lebih tinggi dibandingkan material permukaan aspalnya sendiri. Variasi ukuran butir, litologi, dan sifat elektromagnetik antar-material pada wilayah ini berpotensi menghasilkan *scattering* dan *diffraction*.

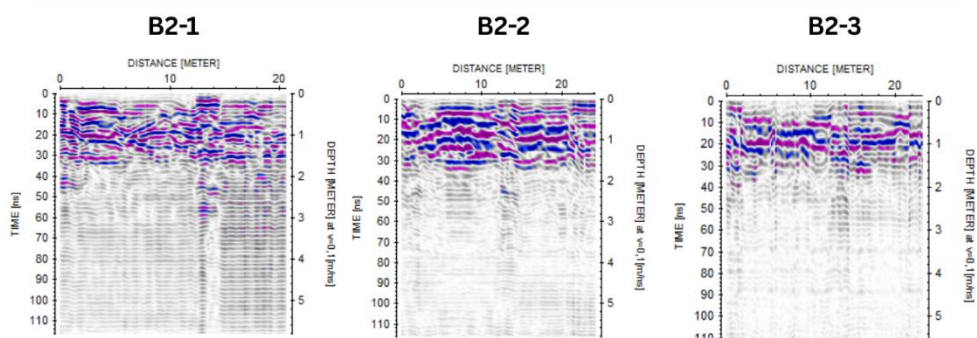
4.3 Interpretasi Medium Beton

Pada medium beton, karakteristik material permukaan dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respons GPR karena beton tersusun atas agregat, pasta semen, pori, air, dan pada struktur bertulang dapat mengandung tulangan. Secara visual, reflektor pada medium beton relatif lebih tebal dan rapat dibandingkan dengan reflektor pada medium tanah dan aspal. Karakter tersebut dapat berkaitan dengan nilai permitivitas beton yang relatif tinggi, yang menyebabkan kecepatan propagasi gelombang elektromagnetik menjadi lebih rendah. Namun, ketebalan reflektor pada radargram tidak secara langsung merepresentasikan ketebalan fisik lapisan, melainkan juga dipengaruhi oleh panjang gelombang, *bandwidth* antenna, serta interferensi dari beberapa refleksi yang berdekatan (Feranie et al., 2023; Putranto & Sumargana, 2023).

BEKASI, JAWA BARAT



KOTA DENPASAR, BALI



Gambar 6. Hasil radargram pada medium beton

Radargram B1-1, B1-2, dan B1-3 memperlihatkan reflektor dengan amplitudo relatif kuat dan pola yang cukup rapat pada zona dangkal. Zona amplitudo kuat terlihat hingga TWT rata-rata sekitar 50 ns ekuivalen dengan 2,5 m. Lintasan berada di lingkungan endapan sungai muda yang terdiri atas pasir, lumpur, kerikil, dan kerakal (Achdan & Sudana, 1992). Jika beton berada di atas material aluvial tersebut, perbedaan sifat elektromagnetik antara beton dan material aluvial di bawahnya dapat menghasilkan kontras sifat elektromagnetik yang dapat membentuk reflektor kuat pada zona dangkal. Selain itu, keberadaan air pori pada endapan aluvial, khususnya pada material berbutir halus, berpotensi meningkatkan atenuasi gelombang elektromagnetik.

Pola yang serupa juga ditunjukkan oleh radargram B2-1, B2-2, dan B2-3 yang berada di Kota Denpasar pada kawasan pesisir, didominasi endapan aluvium yang terdiri atas kerakal, kerikil, pasir, lanau dan lempung (Ipranta & Suwijanto, 2010). Zona amplitudo kuat terlihat hingga TWT rata-rata sekitar 38 ns ekuivalen dengan 1,8 m. Kedekatan lokasi dengan lingkungan pesisir memungkinkan keberadaan air tanah dangkal dan peningkatan kadar air pori, yang dapat meningkatkan permitivitas sekaligus konduktivitas medium. Dengan demikian, respons radargram pada lintasan Kota Denpasar tidak hanya dipengaruhi oleh kontras antara beton dan lapisan di bawahnya, tetapi juga oleh karakteristik endapan aluvial dan kondisi hidrogeologi kawasan pesisir.

4.4 Perbandingan Antar-Medium

Berdasarkan hasil interpretasi radargram GPR frekuensi 250 MHz, respons pada medium tanah, aspal, dan beton menunjukkan karakteristik yang berbeda, baik dari segi kontinuitas reflektor, pola amplitudo, maupun kompleksitas refleksi. Zona amplitudo kuat di setiap radargram merepresentasikan reflektor utama. Melalui perhitungan matematis menggunakan persamaan (3.9), diperoleh kecepatan propagasi gelombang elektromagnetik dalam material V_m yang disajikan dalam Tabel 3. Karena tabel referensi (Tabel 2) memberikan rentang ϵ_r , untuk perhitungan V_m , digunakan nilai representatif sebagai pendekatan yaitu tanah $\epsilon_r = 8$, aspal $\epsilon_r = 10$, dan beton $\epsilon_r = 15$. Nilai ini merupakan asumsi referensi, bukan hasil pengukuran langsung.

Tabel 3. Ringkasan nilai kedalaman reflektor utama dan V_m terhadap variasi medium permukaan

Medium Permukaan	Batas Reflektor Utama (m)	V_m (m/ns)
Tanah	2,2 - 2,9	0,106
Aspal	1,9 - 2,6	0,095
Beton	1,8 - 2,5	0,077

Tabel 3 memperlihatkan adanya perbedaan karakteristik respons gelombang elektromagnetik yang dipancarkan pada tiap medium permukaan. Medium tanah memiliki nilai V_m sebesar 0,106 m/ns, diikuti oleh medium aspal sebesar 0,095 m/ns dan beton sebesar 0,077 m/ns. Hal ini sesuai dengan teori hubungan antara kecepatan rambat dan permitivitas relatif, dimana semakin tinggi permitivitas relatif suatu material, semakin rendah kecepatan rambat gelombang elektromagnetik di dalamnya. Dengan demikian, gelombang secara teoritis merambat paling cepat pada medium tanah dan paling lambat pada medium beton. Meskipun demikian, nilai tersebut merupakan estimasi teoritis dan belum merepresentasikan kecepatan aktual pada setiap lokasi penelitian.

Secara empiris, batas reflektor utama pada medium tanah berada pada kedalaman sekitar 2,2–2,9 m, medium aspal sekitar 1,9–2,6 m, dan medium beton sekitar 1,8–2,5 m. Kedalaman reflektor yang relatif lebih besar pada medium tanah dapat berkaitan dengan karakteristik geologi bawah permukaan di Deli Serdang dan Magelang, yang masing-masing tersusun atas material sedimen aluvial dan material vulkanik. Sementara itu, variasi kedalaman reflektor pada medium aspal dan beton dapat dipengaruhi oleh perbedaan struktur lapisan perkerasan, material pondasi,

litologi bawah permukaan, serta sifat elektromagnetik material pada masing-masing lokasi. Oleh karena itu, perbedaan kedalaman reflektor utama tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan perbedaan kecepatan rambat teoritis, melainkan perlu mempertimbangkan kondisi geologi dan karakteristik medium secara keseluruhan.

Hasil perbandingan juga menunjukkan bahwa reflektor yang dapat diidentifikasi dengan jelas pada radargram umumnya melemah pada kedalaman sekitar 2 m, meskipun pada beberapa lintasan zona reflektif masih dapat diikuti hingga kedalaman yang lebih besar. Secara umum, frekuensi GPR 250 MHz dapat digunakan untuk investigasi bawah permukaan hingga 3-5 m (Ghazali et al., 2019; Nishchal & Kanika, 2026). Namun, kedalaman pencitraan efektif sangat bergantung pada sifat elektromagnetik material, terutama permitivitas dan konduktivitas, serta tingkat heterogenitas bawah permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa kedalaman pencitraan efektif pada data penelitian lebih dibatasi oleh atenuasi dan kompleksitas medium daripada oleh frekuensi antenna semata. Material yang heterogen, memiliki kontras elektromagnetik tinggi, kandungan lempung atau kelembapan yang lebih besar, maupun *scattering* yang kuat dapat menyebabkan energi radar melemah sebelum mencapai kedalaman teoritis maksimum.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis radargram GPR frekuensi 250 MHz, medium tanah, aspal, dan beton menunjukkan karakteristik refleksi yang berbeda dalam hal kontinuitas, amplitudo, kompleksitas pola, dan kedalaman reflektor utama. Kedalaman reflektor utama pada medium tanah berkisar 2,2–2,9 m, aspal 1,9–2,6 m, dan beton 1,8–2,5 m. Kecepatan rambat teoritis berdasarkan permitivitas relatif masing-masing medium adalah $0,106 \text{ m}/n_s$ pada tanah, $0,095 \text{ m}/n_s$ pada aspal, dan $0,077 \text{ m}/n_s$ pada beton. Perbedaan respons tersebut menunjukkan bahwa karakteristik elektromagnetik material serta kondisi geologi bawah permukaan berperan dalam menentukan pola refleksi dan kedalaman pencitraan efektif. Reflektor yang melemah pada kedalaman tertentu mengindikasikan pengaruh atenuasi dan heterogenitas material terhadap kualitas sinyal. Dengan demikian, respons GPR 250 MHz tidak hanya ditentukan oleh jenis medium permukaan, tetapi juga oleh kondisi bawah permukaan pada setiap lokasi pengukuran. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan pengukuran kadar air dan konduktivitas material secara aktual untuk mengevaluasi pengaruh atenuasi terhadap kedalaman pencitraan.

DAFTAR PUSTAKA

- Achdan, & Sudana. (1992). *Peta Geologi Lembar Karawang, Jawa*.
- Bobrov, P. P., Mironov, V. L., Kondratyeva, O. V., & Repin, A. V. (2010). The effect of clay and organic matter content on the dielectric permittivity of soils and grounds at the frequency range from 10 MHz TO 1 GHz. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, (6), 4433–4435. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5652152>
- Bracale, M., Campillo, M., Shapiro, N. M., Brossier, R., & Melnik, O. (2025). Multiple Scattering of Seismic Waves in a Heterogeneous Magmatic System and Spectral Characteristics of Long Period Volcanic Earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130(12). <https://doi.org/10.1029/2025JB031850>
- Cameron, Aspden, Bridge, Djunuddin, Ghazali, & Harahap. (1982). *Peta Geologi Lembar Medan, Sumatera Utara*.
- Feranie, S., Tohari, A., Karmila, I., & Puspitasari, A. D. (2023). Penerapan Metode GPR dan Geoteknik pada Kajian Jalan, Jembatan, dan Lereng : Review. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*, 6(2), 51–64. <https://doi.org/10.24246/juses.v6i2p51-64>
- Gao, S., & Hu, D. (2026). Ground Penetrating Radar for Subsurface Utility Detection: Methods, Challenges, and Future Directions. *Sensors*, 26(9), 1–36. <https://doi.org/10.3390/s26092708>
- Ghazali, R., Rauf, A., Rasam, A., Razali, M. H., Razali, R., & Latif, Z. A. (2019). *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering Estimation of different subsurface materials depth using Ground Penetrating Radar*. 8(1), 363–370.
- Ipranta, & Suwijanto. (2010). *Peta Geologi Lembar Denpasar, Bali Hasil Interpretasi Citra DEM 30*.
- Kastowo, Gerhard, Gafoer, & Amin. (1996). *Peta Geologi Lembar Padang, Sumatera Barat*.
- Koesoemadinata, S., & Situmorang, S. (2012). *Peta Geologi Kuarter Lembar Bekasi, Jawa*.
- Lestari, W., Jannah, A. N., Faqih, A., Sabhna, M., Dita, A., Juliandro, D., & Rahayu, K. (2024). IDENTIFIKASI KEMENERUSAN PIPA AIR BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR). *Jurnal Geosaintek*, 10(1), 22–29.
- López, Y. A., & García-Fernández, M. (2021). Advanced Techniques for Ground Penetrating Radar Imaging. *Remote Sensing*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-2150-3>
- Meyer, K., Erdogmus, E., Morcou, G., & Naughtin, M. (2008). Use of ground

- penetrating radar for accurate concrete thickness measurements. *Proceedings of the AEI 2008 Conference - AEI 2008: Building Integration Solutions*, 328. [https://doi.org/10.1061/41002\(328\)67](https://doi.org/10.1061/41002(328)67)
- Nishchal, S., & Kanika, C. (2026). Ground Penetrating Radar in Forensic Science: Applications, Methodologies, Challenges, and Future Directions, A Comprehensive Review. *Perspectives in Legal and Forensic Sciences*, 3(1), 10002–10002. <https://doi.org/10.70322/plfs.2026.10002>
- Nurwidyanto, M. I., Yustiana, M., & Widada, S. (2006). Effect of grain size on porosity and permeability in sandstones (In Indonesia). *Berkala Fisika*, 9(4), 191–195.
- Putranto, I. D., & Sumargana, L. (2023). Penggunaan Metode GPR 2D Untuk Identifikasi Korosi Tulangan Besi Beton Penahan Air di Lokasi X. *Prisma Fisika*, 10(3), 451. <https://doi.org/10.26418/pf.v10i3.60711>
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2nd Edition*.
- Sugiarto, B., Junursyah, G. M. L., & Pratomo, I. (2018). Identifikasi Objek Bawah Permukaan Menggunakan Metode. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral / Journal of Geology and Mineral Resources*, 19(4), 197–207.
- Syam, A., Lepong, P., & Supriyanto. (2019). APLIKASI METODE GEORADAR UNTUK IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI DI JALAN HM. ARDAN RING ROAD 1 SAMARINDA. *Jurnal Geosains Kutai Basin*, 2(1), 1–7.
- Telford, W. . (1990). *Applied Geophysics, Second Edition*.
- Thanden, R., Sumadirdja, H., Richards, P., Sutisna, K., & Amin, T. (1996). *Peta Geologi Lembar Magelang dan Semarang, Jawa*.
- Tunggulgeni, E., Oetomo, P., Fauzan, S. A., Harianja, R., Suprayogi, S., Purba, J. T., Supriyadi, S. B., Purba, W. M., Putri, B. A. N., Siwabessy, E. F. C., Agustin, V., Pasaribu, R. M., & Nurhafiyyan, M. Y. (2026). Identifikasi Rembesan dan Lendutan Bendungan Mamak Menggunakan Metode Geolistrik dan Georadar dengan Solusi Penanganannya Menggunakan Geokomposit. *Blend Sains Jurnal Teknik*, 4(4), 657–677. <https://doi.org/10.56211/blendsains.v4i4.1346>
- Xu, H., Yan, J., Feng, G., Jia, Z., & Jing, P. (2024). Rock Layer Classification and Identification in Ground-Penetrating Radar via Machine Learning. *Remote Sensing*, 16(8), 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs16081310>
- Yadav, K. K., Yadav, A. K., & Sinha, S. K. (2026). Subsurface utility mapping using ground-penetrating radar in a dense urban environment of historic Lucknow city: implications for infrastructure safety and sustainable city planning. *Measurement*, 291(September), 123141. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.123141>