



ANALISIS KESESUAIAN HUBUNGAN RESISTIVITAS DAN KONDUKTIVITAS BERDASARKAN INTEGRASI DATA GEOLISTRIK DAN *GROUND PENETRATING RADAR (GPR)* UNTUK KARAKTERISASI BAWAH PERMUKAAN DI BEBERAPA DAERAH

U. N. Oktaviani¹, A. K. Aziz¹ R. N. Nababan¹

¹PT. Abhinaya Mappindo Bumitala

PT. Abhinaya Mappindo Bumitala

www.abhinaya-mb.com

cs@abhinaya-mb.com

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi hubungan resistivitas dan konduktivitas melalui integrasi data Geolistrik dan *Ground Penetrating Radar (GPR)* pada lokasi Cililitan, Bogor, dan Bali. Data geolistrik diperoleh menggunakan Geomative GD-10 konfigurasi dipole-dipole, sedangkan GPR menggunakan antenna 100 MHz. Analisis dilakukan dengan membandingkan distribusi resistivitas terhadap karakter reflektor dan kecenderungan atenuasi pada radargram. Hasil menunjukkan bahwa zona resistivitas rendah umumnya berasosiasi dengan respons GPR yang lebih homogen dan pelemahan refleksi, sedangkan zona yang lebih resistif cenderung menunjukkan refleksi yang lebih jelas. Namun, tingkat kesesuaian tidak seragam pada seluruh lintasan, terutama pada kondisi bawah permukaan yang heterogen. Hasil ini menunjukkan bahwa hubungan resistivitas–konduktivitas secara umum tercermin pada karakter atenuasi GPR, tetapi respons radargram tidak hanya dikontrol oleh konduktivitas sehingga integrasi kedua metode diperlukan untuk memperoleh interpretasi bawah permukaan yang lebih komprehensif.

Kata kunci: resistivitas, konduktivitas, geolistrik, GPR, atenuasi.

Abstract

This study evaluates the relationship between resistivity and conductivity through the integration of electrical resistivity and Ground Penetrating Radar (GPR) data from Cililitan, Bogor, and Bali. Electrical resistivity data were acquired using a Geomative GD-10 with a dipole-dipole configuration, while GPR data were collected using a 100 MHz antenna. The analysis was conducted by comparing the resistivity distribution with reflector characteristics and attenuation trends observed in the radargrams. The results show that low-resistivity zones are generally associated with more homogeneous GPR responses and weaker reflections, whereas more resistive zones tend to exhibit clearer reflections. However, the degree of agreement is not uniform across all survey lines, particularly in areas with heterogeneous subsurface conditions. These findings indicate that the resistivity–conductivity relationship is generally reflected in GPR attenuation characteristics, although radargram responses are not controlled solely by conductivity. Therefore, integrating both methods is necessary to obtain a more comprehensive interpretation of subsurface conditions.

Keywords: resistivity, conductivity, electrical resistivity, GPR, attenuation.



1. PENDAHULUAN

Karakterisasi bawah permukaan merupakan tahapan penting dalam berbagai studi geologi, geoteknik, hidrogeologi, dan lingkungan karena dapat memberikan informasi mengenai distribusi material penyusun bawah permukaan serta kondisi fisiknya. Berbagai metode geofisika telah dikembangkan untuk mendukung investigasi bawah permukaan secara non-destruktif, salah satunya adalah metode geolistrik resistivitas. Metode ini memanfaatkan respon kelistrikan material terhadap injeksi arus listrik untuk memperoleh distribusi resistivitas bawah permukaan. Nilai resistivitas dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis litologi, porositas, kandungan air, tingkat kejenuhan, serta salinitas fluida pori, sehingga sering digunakan untuk mengidentifikasi variasi kondisi geologi bawah permukaan (Reynolds, 2011; Telford et al., 1990).

Selain geolistrik, *Ground Penetrating Radar (GPR)* merupakan metode geofisika yang banyak digunakan untuk investigasi dangkal karena memiliki resolusi yang tinggi dalam memetakan struktur bawah permukaan. Metode GPR bekerja dengan memancarkan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi ke dalam tanah dan merekam gelombang yang dipantulkan kembali akibat adanya kontras sifat elektromagnetik antar lapisan (Daniels, 2004). Kualitas citra radar yang dihasilkan dipengaruhi oleh permitivitas dielektrik dan konduktivitas listrik medium. Material dengan konduktivitas tinggi cenderung menyebabkan pelemahan energi gelombang radar (*attenuation*) yang lebih besar sehingga kedalaman penetrasi radar menjadi lebih rendah, sedangkan material dengan konduktivitas rendah memungkinkan gelombang radar merambat lebih jauh dan menghasilkan reflektor yang lebih jelas (Jol, 2009; Daniels, 2004).

Secara teoritis, resistivitas (ρ) dan konduktivitas (σ) merupakan parameter kelistrikan yang memiliki hubungan berbanding terbalik yang dinyatakan melalui hubungan $\sigma=1/\rho$ (Telford et al., 1990; Reynolds, 2011). Hubungan tersebut menunjukkan bahwa material dengan resistivitas tinggi akan memiliki konduktivitas rendah, sedangkan material dengan resistivitas rendah akan memiliki konduktivitas tinggi. Dalam survei GPR, variasi konduktivitas medium memengaruhi propagasi gelombang elektromagnetik yang kemudian tercermin pada karakteristik radargram, seperti kedalaman penetrasi, amplitudo refleksi, dan tingkat atenuasi sinyal (Daniels, 2004; Jol, 2009). Oleh karena itu, integrasi data geolistrik resistivitas dan *Ground Penetrating Radar (GPR)* berpotensi digunakan untuk mengevaluasi konsistensi hubungan antara resistivitas dan konduktivitas pada berbagai kondisi bawah permukaan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan resistivitas dan konduktivitas berdasarkan integrasi data geolistrik resistivitas dan *Ground Penetrating Radar (GPR)* melalui perbandingan beberapa studi kasus. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai resistivitas hasil geolistrik terhadap karakteristik radargram GPR untuk mengevaluasi kesesuaian hubungan teoritis antara resistivitas dan konduktivitas dalam karakterisasi bawah permukaan.



2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Metode Geolistrik Resistivitas

Metode geolistrik resistivitas merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan sifat kelistrikan material bawah permukaan untuk mengidentifikasi kondisi geologi dan distribusi lapisan batuan. Prinsip dasar metode ini adalah menginjeksikan arus listrik ke dalam tanah melalui elektroda arus, kemudian mengukur beda potensial yang timbul menggunakan elektroda potensial. Berdasarkan nilai arus dan beda potensial yang diperoleh, dapat dihitung nilai resistivitas semu yang merepresentasikan sifat kelistrikan bawah permukaan (Telford et al., 1990). Nilai resistivitas suatu material dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jenis litologi, porositas, kandungan air, tingkat kejenuhan, temperatur, serta kandungan mineral konduktif. Material yang mengandung air dengan kadar ion tinggi umumnya memiliki resistivitas rendah karena lebih mudah menghantarkan arus listrik. Sebaliknya, batuan kompak dan kering cenderung memiliki resistivitas yang lebih tinggi (Reynolds, 2011).

2.2. *Ground Penetrating Radar (GPR)*

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan metode geofisika yang menggunakan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi untuk memetakan kondisi bawah permukaan. Gelombang radar dipancarkan ke dalam tanah melalui antena pemancar dan akan mengalami refleksi ketika melewati batas dua material yang memiliki sifat elektromagnetik berbeda. Sinyal pantulan kemudian direkam oleh antena penerima dan ditampilkan dalam bentuk radargram (Daniels, 2004). Kedalaman penetrasi dan resolusi data GPR dipengaruhi oleh frekuensi antena yang digunakan. Selain frekuensi, propagasi gelombang radar juga dipengaruhi oleh permitivitas dielektrik dan konduktivitas listrik medium (Jol, 2009).

2.3. Hubungan Resistivitas dan Konduktivitas

Resistivitas dan konduktivitas merupakan parameter kelistrikan yang digunakan untuk menggambarkan kemampuan suatu material dalam merespons aliran arus listrik. Resistivitas (ρ) menunjukkan kemampuan material dalam menghambat aliran arus listrik, sedangkan konduktivitas (σ) menunjukkan kemampuan material dalam menghantarkan arus listrik. Kedua parameter tersebut merupakan sifat intrinsik material yang dipengaruhi oleh komposisi mineral, porositas, kandungan fluida pori, tingkat kejenuhan, dan salinitas air pori (Telford et al., 1990; Reynolds, 2011). Hubungan antara hambatan listrik dan resistivitas dapat diturunkan dari konsep dasar aliran arus listrik pada suatu medium homogen.

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (1)$$

dengan:

R = hambatan listrik (Ω)

ρ = resistivitas (Ωm)

L = panjang medium (m)

A = luas penampang medium (m^2)



Persamaan tersebut menunjukkan bahwa hambatan listrik berbanding lurus dengan resistivitas dan panjang medium, serta berbanding terbalik dengan luas penampang. Semakin besar nilai resistivitas suatu material, semakin besar hambatan listrik yang dimiliki material tersebut. Di sisi lain, kemampuan suatu material dalam menghantarkan arus listrik dinyatakan dalam bentuk konduktansi (G). Konduktansi merupakan kebalikan dari hambatan listrik sehingga dirumuskan sebagai:

$$G = \left(\frac{1}{R}\right) \quad (2)$$

Konduktansi juga dapat dinyatakan sebagai fungsi konduktivitas material

$$G = \sigma \left(\frac{A}{L}\right) \quad (3)$$

dengan:

G = konduktansi (S)

σ = konduktivitas listrik (S/m)

Untuk memperoleh hubungan antara resistivitas dan konduktivitas, Persamaan (1) disubstitusikan ke dalam Persamaan (2):

$$G = \frac{1}{R} \quad (4)$$

$$G = \frac{1}{\rho \left(\frac{L}{A}\right)} \quad (5)$$

$$G = \frac{A}{\rho \cdot L} \quad (6)$$

Sementara itu, berdasarkan Persamaan (3):

$$G = \sigma \left(\frac{A}{L}\right) \quad (7)$$

Karena kedua persamaan menyatakan besaran yang sama (G), maka:

$$\sigma \left(\frac{A}{L}\right) = \frac{A}{\rho \cdot L} \quad (8)$$

Kedua ruas kemudian dikalikan dengan $\frac{L}{A}$, sehingga diperoleh:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \text{ atau } \rho = \frac{1}{\sigma} \quad (9)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa resistivitas dan konduktivitas memiliki hubungan berbanding terbalik. Material dengan resistivitas tinggi akan memiliki konduktivitas rendah karena kemampuan menghantarkan arus listriknya kecil. Sebaliknya, material dengan resistivitas rendah akan memiliki konduktivitas tinggi karena lebih mudah menghantarkan arus listrik (Telford et al., 1990). Hubungan teoritis ini menjadi dasar dalam penelitian untuk mengevaluasi kesesuaian antara nilai resistivitas yang diperoleh dari hasil geolistrik dan respon radargram *Ground Penetrating Radar (GPR)* pada kondisi lapangan.



2.4. Pengaruh Konduktivitas terhadap Respon Ground Penetrating Radar

Konduktivitas listrik merupakan salah satu parameter yang memengaruhi propagasi gelombang elektromagnetik pada metode *Ground Penetrating Radar (GPR)*. Material dengan konduktivitas tinggi cenderung menyerap energi gelombang radar lebih besar sehingga menyebabkan terjadinya atenuasi (*attenuation*) yang tinggi. Kondisi tersebut mengakibatkan amplitudo sinyal melemah dan kedalaman penetrasi radar menjadi lebih dangkal. Sebaliknya, material dengan konduktivitas rendah memungkinkan gelombang radar merambat lebih jauh dengan kehilangan energi yang lebih kecil sehingga menghasilkan penetrasi yang lebih dalam dan reflektor yang lebih jelas pada radargram (Daniels, 2004; Jol, 2009). Pengaruh konduktivitas dapat diamati melalui karakteristik radargram yang meliputi kedalaman penetrasi, amplitudo refleksi, dan tingkat atenuasi sinyal. Radargram pada medium dengan konduktivitas rendah umumnya menunjukkan reflektor yang lebih kuat dan kontinuitas refleksi yang lebih baik, sedangkan medium dengan konduktivitas tinggi cenderung menghasilkan reflektor yang lemah dan penetrasi yang terbatas. Oleh karena itu, karakteristik radargram dapat digunakan sebagai indikator untuk menginterpretasikan kondisi konduktivitas bawah permukaan. Hubungan tersebut memungkinkan data GPR digunakan sebagai pembanding terhadap hasil geolistrik resistivitas untuk mengevaluasi kesesuaian hubungan teoritis antara resistivitas dan konduktivitas pada kondisi lapangan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan mengintegrasikan data geolistrik resistivitas dan Ground Penetrating Radar (GPR) pada tiga lokasi penelitian, yaitu Cililitan (Jakarta), Bogor, dan Bali. Pengukuran geolistrik dilakukan menggunakan Geomatic GD-10 dengan konfigurasi dipole-dipole. Data hasil pengukuran kemudian diolah untuk memperoleh penampang distribusi resistivitas bawah permukaan yang digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi variasi sifat kelistrikan material.

Pengukuran GPR dilakukan menggunakan peralatan UTSI dengan frekuensi antenna 100 MHz. Data GPR disajikan dalam bentuk radargram dan digunakan untuk mengamati karakter respons gelombang elektromagnetik bawah permukaan. Evaluasi radargram dilakukan berdasarkan karakter reflektor, kecenderungan pelemahan atau atenuasi sinyal, serta kemampuan penetrasi gelombang pada setiap interval kedalaman.

Integrasi kedua metode dilakukan dengan membandingkan distribusi resistivitas pada penampang geolistrik dengan karakter radargram pada interval lintasan dan kedalaman yang bersesuaian. Hubungan teoritis antara resistivitas dan konduktivitas ($\sigma=1/\rho$) digunakan sebagai dasar evaluasi. Zona dengan resistivitas relatif rendah merepresentasikan konduktivitas relatif lebih tinggi, kemudian dibandingkan dengan kecenderungan pelemahan respons pada radargram GPR. Hasil perbandingan selanjutnya dievaluasi secara kualitatif untuk menentukan apakah respons GPR menunjukkan kesesuaian, kesesuaian parsial, atau tidak menunjukkan hubungan yang jelas terhadap kecenderungan teoritis resistivitas–konduktivitas.

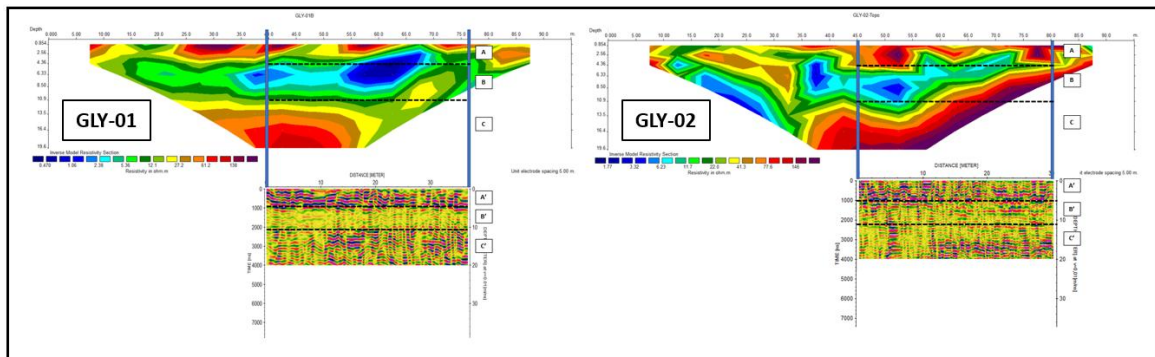


4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian disajikan berdasarkan integrasi data geolistrik resistivitas dan *Ground Penetrating Radar* (GPR) pada beberapa lokasi pengukuran. Analisis dilakukan dengan membandingkan distribusi resistivitas pada penampang geolistrik terhadap karakter respons radargram pada interval kedalaman yang bersesuaian. Evaluasi difokuskan pada perubahan karakter reflektor, tingkat kejelasan respons, serta kecenderungan atenuasi gelombang elektromagnetik.

Secara teoritis, resistivitas dan konduktivitas memiliki hubungan berbanding terbalik. Zona dengan resistivitas relatif rendah merepresentasikan medium dengan konduktivitas yang lebih tinggi. Peningkatan konduktivitas dapat menyebabkan kehilangan energi gelombang elektromagnetik yang lebih besar selama proses perambatan, sehingga respons GPR cenderung mengalami peningkatan atenuasi. Hubungan tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kesesuaian antara distribusi resistivitas dan karakter radargram pada masing-masing lokasi penelitian.

4.1. Hasil Interpretasi Geolistrik dan GPR Lokasi Cililitan, Jakarta



Gambar 1. Penampang geolistrik dan radargram GPR lintasan GLY-01 dan GLY-02 di Cililitan.

Pada lintasan GLY-01, penampang geolistrik menunjukkan keberadaan zona resistivitas relatif rendah pada bagian tengah kedalaman pengamatan, sedangkan pada bagian yang lebih dalam nilai resistivitas cenderung meningkat. Pada radargram, interval yang berkorespondensi dengan zona resistivitas rendah memperlihatkan karakter respons yang relatif lebih homogen dan kontras refleksi yang lebih rendah dibandingkan zona di atas dan di bawahnya. Sementara itu, pada bagian yang lebih resistif, pola refleksi kembali dapat dikenali dengan lebih jelas. Pola tersebut menunjukkan kecenderungan yang konsisten dengan hubungan teoritis bahwa resistivitas rendah merepresentasikan konduktivitas yang lebih tinggi, sehingga kehilangan energi gelombang elektromagnetik cenderung meningkat.

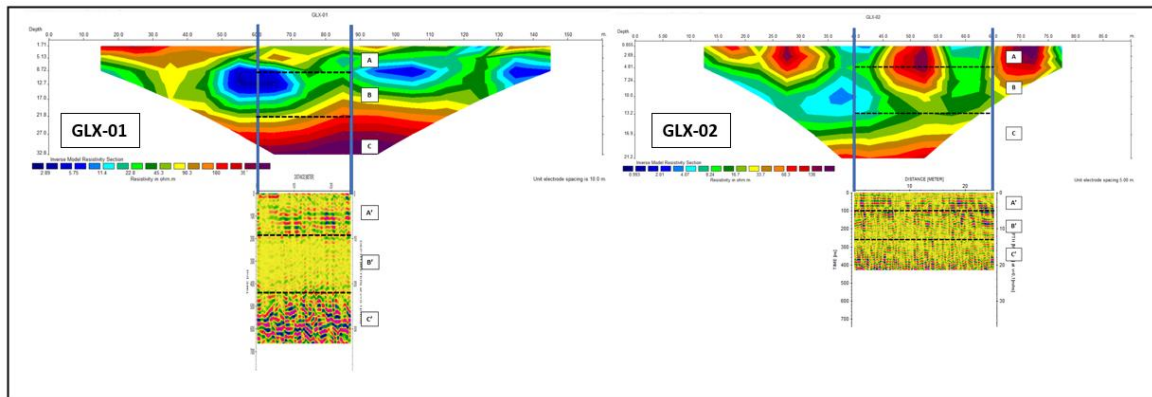
Sedangkan pada lintasan GLY-02, distribusi resistivitas menunjukkan heterogenitas lateral yang lebih besar. Zona resistivitas rendah masih dapat dikenali pada bagian tengah penampang dan pada radargram interval yang bersesuaian menunjukkan kecenderungan respons yang lebih homogen. Pada bagian yang lebih dalam, peningkatan resistivitas diikuti oleh munculnya kembali variasi refleksi yang lebih jelas. Namun,



hubungan tersebut tidak berkembang secara seragam di seluruh lintasan karena perubahan resistivitas yang cukup besar secara lateral. Dengan demikian, lintasan GLY-02 menunjukkan kesesuaian parsial terhadap hubungan teoritis.

Secara keseluruhan, hasil di Cililitan menunjukkan bahwa zona resistivitas rendah cenderung berasosiasi dengan peningkatan pelemahan respons GPR, sedangkan pada zona yang lebih resistif respons refleksi relatif lebih mudah dikenali. Meskipun demikian, hubungan tersebut tidak selalu terlihat secara langsung pada seluruh bagian lintasan, yang menunjukkan bahwa karakter radargram tidak hanya dipengaruhi oleh konduktivitas, tetapi juga oleh variasi sifat elektromagnetik dan heterogenitas material bawah permukaan. Hal tersebut sesuai dengan dasar teori bahwa propagasi GPR dipengaruhi oleh konduktivitas dan permitivitas medium.

4.2. Hasil Interpretasi Geolistrik dan GPR Lokasi Bogor



Gambar 2. Penampang geolistrik dan radargram GPR lintasan GLX-01 dan GLX-02 di Bogor.

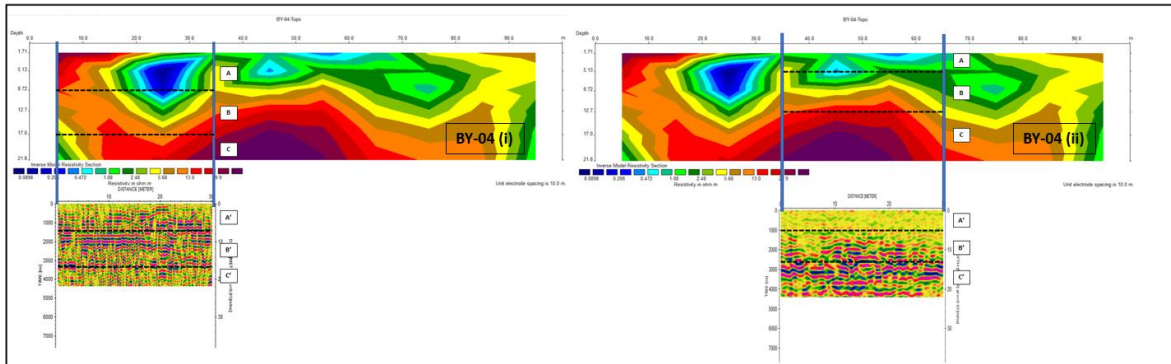
Pada lintasan GLX-01, hubungan antara distribusi resistivitas dan karakter radargram terlihat cukup jelas. Zona dengan resistivitas relatif rendah pada bagian tengah penampang berkorespondensi dengan interval radargram yang memiliki karakter lebih homogen dan kontras refleksi yang relatif rendah. Pada bagian yang lebih dalam, nilai resistivitas meningkat dan diikuti oleh munculnya kembali pola refleksi dengan kontras yang lebih jelas. Pola perubahan tersebut menunjukkan kecenderungan bahwa peningkatan konduktivitas pada zona resistivitas rendah berkaitan dengan meningkatnya atenuasi energi gelombang GPR. Oleh karena itu, GLX-01 menunjukkan kesesuaian yang relatif kuat dengan hubungan teoritis.

Pada lintasan GLX-02, pola yang diperoleh lebih kompleks. Distribusi resistivitas memperlihatkan heterogenitas lateral dengan variasi dari resistivitas rendah hingga tinggi. Pada interval tertentu, zona dengan resistivitas rendah hingga menengah berasosiasi dengan respons radargram yang relatif lebih homogen, sedangkan peningkatan resistivitas pada bagian yang lebih dalam diikuti oleh peningkatan variasi dan kejelasan refleksi. Meskipun kecenderungan tersebut masih searah dengan teori, korelasinya tidak sejelas pada GLX-01 sehingga GLX-02 lebih tepat dikategorikan sebagai kesesuaian parsial.



Secara umum, data Bogor mendukung adanya keterkaitan antara resistivitas bawah permukaan dan karakter propagasi gelombang GPR. GLX-01 menunjukkan hubungan yang lebih jelas, sedangkan GLX-02 menunjukkan bahwa heterogenitas bawah permukaan dapat menyebabkan respons GPR menjadi lebih kompleks. Dengan demikian, hubungan resistivitas–konduktivitas terhadap atenuasi GPR dapat dikenali pada lokasi Bogor, tetapi tingkat kesesuaiannya berbeda antar lintasan.

4.3. Hasil Interpretasi Geolistrik dan GPR Lokasi Bali



Gambar 3. Penampang geolistrik dan radargram GPR lintasan BY-04 (i) dan BY-04 (ii) di Bali

Pada lintasan BY-04 (i), distribusi resistivitas menunjukkan variasi lateral yang cukup besar, terutama pada zona dangkal yang memperlihatkan kedekatan antara anomali resistivitas rendah dan tinggi. Radargram pada interval tersebut masih menunjukkan refleksi yang cukup jelas, sehingga keberadaan zona resistivitas rendah tidak selalu diikuti oleh pola atenuasi yang dapat dikenali secara langsung. Pada bagian yang lebih dalam, resistivitas cenderung meningkat dan respons refleksi GPR tetap dapat diamati dengan baik. Kondisi ini menunjukkan bahwa bagian pertama lintasan BY-04 (i) hanya memperlihatkan kesesuaian parsial terhadap hubungan teoritis.

Pola yang lebih sistematis terlihat pada lintasan BY-04 (ii). Pada zona dangkal yang memiliki resistivitas relatif rendah, radargram memperlihatkan respons yang lebih homogen dengan kontras refleksi yang lebih rendah. Seiring bertambahnya kedalaman, nilai resistivitas meningkat dan diikuti oleh munculnya pola refleksi yang semakin jelas. Perubahan vertikal tersebut menunjukkan hubungan yang konsisten antara peningkatan resistivitas, penurunan konduktivitas relatif, dan berkurangnya kecenderungan atenuasi gelombang GPR. Dengan demikian, bagian kedua lintasan BY-04 (ii) menunjukkan kesesuaian yang relatif kuat dengan teori.

Secara keseluruhan, hasil di Bali menunjukkan bahwa hubungan resistivitas–konduktivitas terhadap respons GPR tidak berkembang secara seragam sepanjang lintasan. Pada lintasan BY-04 (ii) menunjukkan korelasi yang lebih jelas, sedangkan pada lintasan BY-04 (i) hubungan tersebut lebih kompleks. Hal ini menunjukkan bahwa konduktivitas merupakan salah satu faktor yang memengaruhi propagasi gelombang GPR, tetapi bukan satu-satunya parameter yang mengontrol karakter radargram.



4.4. Evaluasi Kesesuaian Hubungan Resistivitas–Konduktivitas terhadap Respons GPR

Berdasarkan hasil integrasi data geolistrik dan *Ground Penetrating Radar (GPR)* pada lokasi Cililitan, Bogor, dan Bali, secara umum terlihat adanya kecenderungan hubungan antara distribusi resistivitas bawah permukaan dan karakter respons radargram. Zona dengan resistivitas relatif rendah cenderung berasosiasi dengan respons radar yang lebih homogen serta pelemahan refleksi yang lebih nyata. Sebaliknya, pada beberapa zona dengan resistivitas lebih tinggi, pola refleksi masih dapat dikenali dengan lebih jelas. Kecenderungan ini sejalan dengan hubungan teoritis antara resistivitas dan konduktivitas, yaitu bahwa penurunan resistivitas berkaitan dengan peningkatan konduktivitas medium. Konduktivitas yang lebih tinggi dapat meningkatkan kehilangan energi gelombang elektromagnetik selama perambatan, sehingga menyebabkan atenuasi sinyal GPR menjadi lebih besar.

Meskipun demikian, tingkat kesesuaian antara distribusi resistivitas dan karakter radargram tidak sama pada setiap lokasi maupun lintasan. Di Cililitan, hubungan tersebut terlihat lebih jelas pada lintasan GLY-01, sedangkan GLY-02 menunjukkan pola yang lebih kompleks akibat variasi resistivitas secara lateral. Kondisi serupa dijumpai di Bogor, di mana GLX-01 memperlihatkan korelasi yang relatif kuat antara zona resistivitas rendah dan pelemahan respons GPR, sedangkan pada GLX-02 kecenderungan yang sama hanya teridentifikasi pada sebagian interval. Di Bali, lintasan BY-04 (ii) menunjukkan perubahan vertikal yang lebih sistematis, yaitu dari zona resistivitas relatif rendah dengan respons radar yang lebih homogen menuju zona resistivitas lebih tinggi dengan pola refleksi yang semakin jelas. Sementara itu, pada BY-04 (i), keberadaan anomali resistivitas rendah tidak selalu diikuti oleh peningkatan atenuasi GPR yang dapat dikenali secara langsung.

Variasi tingkat kesesuaian tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara resistivitas dan karakter radargram tidak selalu bersifat langsung maupun linier pada seluruh kondisi bawah permukaan. Konduktivitas merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi kehilangan energi gelombang GPR, tetapi bukan satu-satunya faktor yang mengontrol karakter radargram. Respons GPR juga dipengaruhi oleh permitivitas dielektrik, kontras sifat elektromagnetik antarunit material, serta heterogenitas lateral dan vertikal bawah permukaan. Oleh karena itu, perubahan karakter refleksi pada radargram tidak selalu mengikuti perubahan resistivitas secara sederhana, terutama pada zona yang memiliki variasi material yang kompleks.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan pada ketiga lokasi menunjukkan bahwa sebagian besar data mendukung kecenderungan teoritis hubungan resistivitas–konduktivitas terhadap atenuasi gelombang GPR, meskipun kesesuaiannya tidak bersifat seragam pada seluruh zona pengamatan. Zona dengan resistivitas relatif rendah umumnya menunjukkan kecenderungan pelemahan respons radar yang lebih besar, sedangkan pada zona yang lebih resistif respons refleksi cenderung masih dapat dikenali dengan lebih baik. Adanya beberapa interval yang tidak menunjukkan pola tersebut menegaskan bahwa interpretasi GPR tidak dapat didasarkan pada konduktivitas saja. Dengan demikian, integrasi metode geolistrik dan GPR lebih tepat digunakan sebagai pendekatan yang saling melengkapi dalam mengevaluasi variasi sifat



kelistrikan dan elektromagnetik bawah permukaan, karena hubungan antara nilai resistivitas dan karakter respons radargram tidak selalu bersifat langsung.

5. KESIMPULAN & SARAN

Hasil integrasi data geolistrik resistivitas dan GPR pada lokasi Cililitan, Bogor, dan Bali menunjukkan bahwa hubungan resistivitas–konduktivitas secara umum tercermin pada karakter atenuasi gelombang GPR. Zona dengan resistivitas relatif rendah cenderung berasosiasi dengan respons radar yang lebih homogen dan mengalami pelemahan refleksi, sedangkan zona dengan resistivitas lebih tinggi umumnya masih menunjukkan refleksi yang lebih jelas.

Namun, tingkat kesesuaian tersebut berbeda pada setiap lintasan dan tidak selalu muncul secara langsung pada seluruh zona pengamatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa konduktivitas merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi atenuasi GPR, tetapi bukan satu-satunya faktor yang mengontrol karakter radargram. Variasi permitivitas, kontras material, serta heterogenitas bawah permukaan juga berperan dalam membentuk respons GPR. Oleh karena itu, integrasi geolistrik dan GPR memberikan interpretasi bawah permukaan yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan masing-masing metode secara terpisah. Hal ini sejalan dengan dasar teori dalam naskah bahwa propagasi GPR dipengaruhi oleh konduktivitas dan permitivitas medium.

Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan analisis secara kuantitatif dengan membandingkan nilai resistivitas terhadap parameter GPR seperti amplitudo, energi sinyal, atau tingkat atenuasi. Penggunaan data pendukung berupa litologi, kadar air, dan sifat dielektrik material juga diperlukan untuk menjelaskan zona yang tidak menunjukkan hubungan langsung antara resistivitas dan respons GPR.

DAFTAR PUSTAKA

- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar* (2nd ed.). Institution of Engineering and Technology.
- Jol, H. M. (Ed.). (2009). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier.