

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang kaya akan sumber daya mineral dan batuan, termasuk batugamping yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku industri semen, konstruksi, dan industri kimia. Cadangan batugamping di Indonesia diperkirakan mencapai puluhan miliar ton yang tersebar di berbagai wilayah, terutama di Jawa, Sulawesi, dan Sumatera. Namun, batugamping merupakan batuan sedimen karbonat yang rentan terhadap proses pelarutan kimiawi (karstifikasi), yang dapat membentuk rongga-rongga bawah permukaan dengan berbagai ukuran (Ford & Williams, 2007). Keberadaan rongga atau cavity di dalam batugamping dapat menimbulkan risiko signifikan terhadap stabilitas tambang, menyebabkan keruntuhan mendadak, subsidensi permukaan, dan bahaya geoteknik lainnya yang mengancam keselamatan operasi pertambangan (Waltham et al., 2005). Oleh karena itu, identifikasi rongga secara akurat menjadi aspek kritis dalam kegiatan eksplorasi batugamping untuk mendukung ketersediaan bahan baku industri yang berkualitas dan menjamin keamanan operasi penambangan.

PT. Bukit Gamping Resources adalah salah satu perusahaan pertambangan batugamping yang beroperasi di Kabupaten Buton Tengah, Sulawesi Tenggara, dengan Izin Usaha Pertambangan (IUP) untuk mengelola sumber daya batugamping yang tersebar di beberapa desa. Kondisi geologi di lokasi tersebut cukup kompleks dengan keberadaan batugamping yang memiliki karakteristik berbeda akibat proses pembentukan dan aktivitas tektonik. Perbedaan karakteristik ini berpengaruh signifikan terhadap struktur internal batuan, termasuk distribusi porositas dan permeabilitas yang menjadi faktor pengontrol pembentukan rongga karst. Selain itu, keberadaan struktur tektonik berupa sesar dan lipatan menciptakan jalur-jalur preferensial bagi aliran air tanah yang mempercepat proses pelarutan dan pembentukan rongga, sehingga distribusi rongga bawah permukaan menjadi tidak merata dan sulit diprediksi tanpa investigasi geofisika yang memadai (Goldscheider et al., 2008). Dalam rangka mendukung kegiatan eksplorasi yang efektif dan aman, PT. Bukit Gamping Resources memerlukan metode yang dapat mengidentifikasi keberadaan rongga di bawah permukaan batugamping secara non-destruktif. Keberadaan rongga dapat menyebabkan berbagai permasalahan dalam operasi pertambangan, seperti risiko geoteknik yang dapat menyebabkan keruntuhan pada lantai tambang atau infrastruktur pendukung, penurunan kualitas sumber daya akibat diskontinuitas lapisan batugamping berkualitas tinggi, serta ancaman serius terhadap keselamatan pekerja tambang terutama saat dilakukan blasting atau penggalian. Metode investigasi konvensional seperti pemboran eksplorasi memiliki keterbatasan dalam mendeteksi rongga karena sifatnya yang punktual dan biaya yang tinggi, sehingga pemboran mungkin melewatkan rongga-rongga yang berada di antara titik-titik bor. Oleh karena itu, diperlukan metode komplementer yang dapat memberikan gambaran kontinu mengenai kondisi bawah permukaan dengan tingkat akurasi yang memadai dan biaya yang lebih efisien (Schoor, 2006).

Metode resistivitas listrik, khususnya Electrical Resistivity Tomography (ERT), merupakan teknik geofisika yang umum digunakan untuk investigasi bawah permukaan dalam mendeteksi rongga di batuan karbonat. Metode ini bekerja dengan menginjeksikan arus listrik ke dalam tanah dan mengukur beda potensial yang dihasilkan, sehingga dapat menghitung distribusi resistivitas bawah permukaan (Telford et al., 1990). Rongga yang berisi udara atau air dengan konduktivitas rendah akan menghasilkan anomali resistivitas yang berbeda secara signifikan dibandingkan batuan padat di sekitarnya. Metode ERT memungkinkan pemetaan distribusi resistivitas secara 2D atau 3D dengan resolusi tinggi melalui pengukuran otomatis menggunakan berbagai konfigurasi elektroda, yang kemudian diolah menggunakan teknik inversi untuk menghasilkan gambaran struktur bawah permukaan (Chalikakis & Plagnes, 2011).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis resistivitas menggunakan metode *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) guna mengidentifikasi rongga pada batugamping di lokasi eksplorasi PT. Bukit Gamping Resources, Kabupaten Buton Tengah, Sulawesi Tenggara. Secara spesifik, penelitian ini akan mengidentifikasi keberadaan, lokasi, dan dimensi rongga bawah permukaan pada batugamping. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi geologi bawah permukaan yang akurat untuk mendukung pengelolaan sumber daya batugamping secara optimal, meningkatkan keamanan operasi penambangan dengan mengidentifikasi zona-zona berisiko tinggi, serta berkontribusi pada pengembangan aplikasi metode geofisika untuk eksplorasi batugamping di Indonesia, khususnya di wilayah dengan kondisi geologi kompleks seperti Sulawesi Tenggara.

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi keberadaan rongga (*cavity*) pada struktur batugamping di daerah penelitian berdasarkan interpretasi data geolistrik resistivitas.
2. Menentukan sebaran dan kedalaman rongga (*cavity*) bawah permukaan yang berpotensi mempengaruhi kegiatan eksplorasi di lokasi penelitian.

1.2.2 Manfaat

Adapun Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi geologi bawah permukaan yang dapat digunakan untuk mendukung kegiatan eksplorasi dan eksploitasi batugamping yang lebih aman dan efisien.
2. Membantu mengidentifikasi potensi bahaya geoteknik akibat keberadaan rongga, sehingga dapat digunakan sebagai referensi dalam perencanaan teknik tambang atau konstruksi di area penelitian.

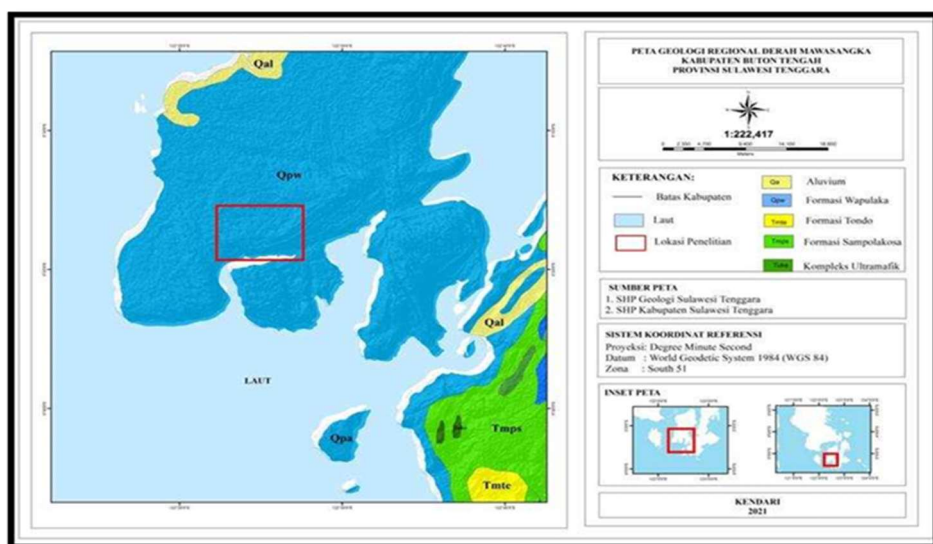
3. Menyediakan data resistivitas yang dapat menjadi referensi bagi penelitian lebih lanjut terkait metode geolistrik dalam eksplorasi batugamping.

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Geologi Regional

Pulau Sulawesi memiliki luas sekitar 172.000 km², yang jika diukur bersama pulau-pulau kecil di sekitarnya mencapai 188.000 km², menjadikannya pulau terluas kedua di Indonesia setelah Pulau Papua dengan luas 785.360 km². Pulau ini telah mengalami proses tektonik yang sangat kompleks sepanjang waktu geologi karena terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik, dua di antaranya bergerak aktif. Berdasarkan Hamilton (1979), Silver et al. (1983), Smith dan Silver (1991), serta Smith (1991), bagian baratnya merupakan tepi tenggara Lempeng Benua Eurasia, bagian tenggara terbentuk oleh Lempeng Benua Australia yang bergerak ke utara, sedangkan bagian timur laut ditempati oleh Lempeng Samudra Pasifik atau Lempeng Samudra Filipina yang bergerak ke barat. Kompleksitas tektonik ini menghasilkan bentuk khas berhuruf "K" pada Pulau Sulawesi, beserta struktur geologi, stratigrafi yang rumit, serta komposisi batuan yang beragam (Hamimu et al., 2024).

Pulau Buton terletak di Indonesia Timur, lepas pantai tenggara Pulau Sulawesi, dengan gaya stratigrafi dan struktural yang sangat berbeda dari Sulawesi Tenggara serta Pulau Muna, meskipun memiliki kesamaan luas dengan pulau-pulau tetangga di Arc Banda seperti Timor, Seram, dan Buru, di mana sedimentasi butirannya dikendalikan oleh empat peristiwa tektonik. Secara litostratigrafi, Pulau Muna yang relatif sederhana terbagi menjadi dua formasi utama: Formasi Mukito sebagai formasi tertua berumur pra-Trias yang hanya menempati 5% wilayah pulau dengan litologi sekis dan filit, serta Formasi Wapulaka berumur Pleistosen yang mendominasi lebih dari 85% luas pulau, terutama tersusun dari batugamping terumbu, batugamping dolomitan, batugamping pasir yang pejal dan keras, batu lempung lunak, serta endapan aluvium. Berdasarkan Davidson (1991), Formasi Wapulaka dibedakan menjadi dua fasies: fasies batugamping pasir, batupasir gampingan, dan batu lempung di bagian baratlaut, serta fasies batugamping terumbu dan dolomitan di timurlaut serta selatan pulau. Satuan termuda berupa endapan aluvium—terdiri dari batulempung, batupasir, dan kerikil lepas dengan fragmen batugamping dominan—menempati tepi pantai utara, barat, dan timurlaut Kota Raha, termasuk teras pantai dengan elevasi 12 meter di atas muka laut dan gawir setinggi 1,5–2 meter yang memanjang utara-selatan. Berbeda dengan Pulau Buton yang berstruktur kompleks, Pulau Muna dipetakan tanpa struktur geologi yang jelas, meskipun bentuk pulau menunjukkan kemungkinan batuan dasarnya dikontrol oleh orientasi struktur serupa dengan Buton, dimana peta geologi ditunjukkan pada Gambar 1 (Ade et al., 2021).



Gambar 1. Peta Geologi lembar Buton – Muna (Ade et al., 2021)

1.3.2 Batugamping

Batugamping merupakan batuan sedimen yang sebagian besar tersusun dari kalsium karbonat (CaCO_3), yang berasal dari sisa-sisa organisme laut seperti kerang, siput laut, dan koral yang telah mati. Pembentukannya dapat terjadi secara organik, mekanik, maupun kimiawi. Batugamping organik terbentuk melalui pengendapan cangkang, siput, serta ganggang dari kerangka koral di alam. Batugamping mekanik tidak jauh berbeda dari jenis organiknya, dengan perbedaan utama pada proses perombakan material batugamping yang terbawa arus dan mengendap dekat lokasi semula. Batugamping kimiawi adalah jenis batugamping yang terbentuk pada kondisi iklim dan lingkungan tertentu (Tabuni et al., 2021).

Klasifikasi batuan karbonat menurut para ahli, salah satunya yang diusulkan oleh Dunham (1962), kemudian diperbaiki oleh Embry dan Klovan (1971). Klasifikasi Dunham (1962) mengacu pada tekstur pengendapan batugamping, karena tekstur tersebut tetap terlihat pada sayatan tipis. Klasifikasi batuan karbonat oleh Embry dan Klovan (1971) membagi batugamping menjadi dua kategori besar, yakni *limestone autochthonous* dan *allochthonous*, di mana yang terakhir terdiri dari komponen penyusun yang tidak terikat secara organik selama deposisi. Pembagian antara *limestone allochthonous* dan *autochthonous* sebenarnya sudah ada dalam sistem Dunham, tetapi belum dirinci secara mendalam (Yuwanto, 2019).

Batugamping termasuk jenis bahan galian mineral industri yang komposisi utamanya terdiri dari mineral karbonat, seperti kalsit (CaCO_3), dolomit (MgCO_3), serta mineral sekunder lain misalnya siderit dan rodokrosit. Batugamping dengan kandungan kalsium tinggi melebihi magnesium memiliki kualitas unggul untuk bahan baku semen, sedangkan jika kadar kalsium rendah dan magnesium tinggi, kualitasnya kurang baik untuk semen tetapi sesuai sebagai bahan bangunan. Kadar magnesium yang tinggi

mengganggu proses pengerasan semen karena sulit berikatan dengan unsur lain. Batugamping berisi CaO (kalsium oksida) di atas 50% sangat ideal untuk semen dan bahan bangunan (Santika dan Mulyadi, 2017). Selain semen, batugamping juga dimanfaatkan untuk industri kaca, soda abu, peleburan baja, pemutih kertas dan karet, serta pupuk kapur tohor di pertanian. Sumber daya batugamping melimpah sehingga prospek pengembangan industri pertambangannya sangat menjanjikan, terutama di Pulau Muna dengan hamparan batugamping yang sangat luas (Wuna et al., 2021).

1.3.3 Rongga (Cavity) pada Batugamping

Cavity merupakan rongga atau ruang kosong yang terbentuk di bawah permukaan tanah sebagai hasil dari berbagai proses geologi. Keberadaan *cavity* di *subsurface* mengindikasikan adanya anomali geofisika yang signifikan dan dapat menimbulkan risiko *geohazard* pada infrastruktur di permukaan (Waltham et al., 2005). Dalam konteks geologi karst, *cavity* sering terbentuk melalui proses pelarutan batuan karbonat seperti *limestone* dan dolomit oleh air tanah yang bersifat asam, menciptakan sistem gua dan rongga yang kompleks (Ford & Williams, 2007).

Sinkhole merupakan salah satu manifestasi *cavity* yang paling umum dijumpai, terutama di daerah karst. Sinkhole terbentuk ketika atap *cavity* runtuh akibat tidak mampu lagi menopang beban *overburden*, menciptakan depresi di permukaan tanah yang dapat membahayakan struktur bangunan dan infrastruktur. Berdasarkan mekanisme pembentukannya, *sinkhole* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe yang berbeda karakteristik dan kecepatannya. Tipe pertama adalah *dissolution sinkhole* yang terbentuk secara gradual melalui proses disolusi lambat pada singkapan batu kapur atau *rockhead*, disertai dengan runtuh skala kecil yang berlangsung progresif. Berbeda dengan proses bertahap tersebut, keruntuhan *sinkhole* dapat terjadi secara tiba-tiba dan dramatis melalui kegagalan progresif instan di atas gua besar atau sekelompok gua kecil yang telah terbentuk sebelumnya, menciptakan ancaman yang lebih mendadak bagi area di atasnya.

Pada kondisi geologi dengan lapisan penutup, mekanisme pembentukan *sinkhole* menjadi lebih kompleks. *Caprock sinkhole* atau lubang-lubang kecil terbentuk melalui penggerogotan dan keruntuhan *caprock* yang dapat larut pada rongga karst di batu kapur yang mendasarinya. Sementara itu, karakteristik tanah penutup sangat menentukan jenis *sinkhole* yang terbentuk. Pada tanah penutup kohesif, *dropout sinkhole* berkembang ketika air hujan yang meresap secara perlahan mencuci tanah ke dalam celah stabil dan gua-gua di batu kapur bawahnya, menciptakan subsidensi bertahap. Sebaliknya, pada tanah penutup non-kohesif, *suffosion sinkhole* terbentuk melalui proses pembilas tanah yang lebih cepat oleh air hujan ke celah dan gua-gua yang ada, menghasilkan pola keruntuhan yang berbeda. Seiring perjalanan waktu geologi, *sinkhole-sinkhole* yang telah terbentuk melalui berbagai mekanisme tersebut dapat mengalami transformasi menjadi *buried sinkhole*, yaitu kondisi di mana *sinkhole* lama hasil disolusi atau keruntuhan terisi kembali oleh tanah, puing-puing, atau sedimen akibat perubahan kondisi lingkungan. Keberadaan *buried sinkhole* ini menambah kompleksitas

identifikasi bahaya karst karena tidak terlihat di permukaan namun tetap dapat mempengaruhi stabilitas *ground conditions* (Nur & Hijraini, 2017).

1.3.4 Metode Geolistrik Resistivitas

Metode geolistrik adalah salah satu metode geofisika yang memanfaatkan sifat kelistrikan batuan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan bumi. Metode ini bekerja dengan menginjeksikan arus listrik ke dalam tanah melalui sepasang elektroda arus dan mengukur beda potensial yang dihasilkan melalui sepasang elektroda potensial (Telford et al., 1990).

Pada kondisi sebenarnya, bumi terdiri dari lapisan-lapisan tanah dengan nilai resistivitas yang berbeda-beda. Potensial yang terukur adalah nilai medan potensial medium berlapis. Dengan demikian resistivitas yang terukur di permukaan bumi bukanlah nilai resistivitas yang sebenarnya melainkan resistivitas semu. Resistivitas semu yang terukur merupakan resistivitas gabungan dari beberapa lapisan tanah yang dianggap sebagai satu lapisan homogen (Boimau et al., 2024). Hubungan antara resistivitas "semu" dan resistivitas "sebenarnya" sangatlah kompleks. Untuk menentukan resistivitas sebenarnya dari bawah permukaan tanah diperlukan penginversian hasil resistivitas semu dengan menggunakan program di komputer (Loke, 2004). Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menentukan variasi resistivitas batuan di bawah permukaan, yang dapat memberikan informasi tentang struktur geologi, lapisan tanah, atau keberadaan sumber daya alam seperti air tanah, mineral, atau hidrokarbon (Telford et al., 1990).

Metode geolistrik ini merupakan metode yang banyak digunakan dan menghasilkan data yang baik untuk memetakan lapisan tanah di bawah permukaan seperti eksplorasi air tanah, investigasi struktur geologi, identifikasi zona lemah, pemetaan kontaminasi, dan karakterisasi daerah karst. Pendugaan geolistrik ini didasarkan pada prinsip bahwa material yang berbeda memiliki tahanan jenis yang berbeda ketika dialiri arus Listrik. Perbedaan nilai tahanan jenis setiap material ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini (Hakim dan Manrulu, 2016).

Table 1. Nilai resistivitas batuan (Telford et al., 1990)

Jenis Material	Resistivitas ($\Omega \cdot m$)
Udara (Air)	~
Pirit (Pyrite)	0.01 - 100
Kwarsa (Quartz)	500 – 800000
Kalsit (Calcite)	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Garam Batu (rock Salt)	$30 - 1 \times 10^{13}$

Granit (Granite)	200 – 10000
Andesit (Andesite)	$1.7 \times 10^2 - 45 \times 10^4$
Basalt Basah (Wet)	$1000 - 4 \times 10^4$
Basalt Kering (Dry)	$10 - 1.3 \times 10^7$
Gamping (Limestone)	500 – 10000
Batu Pasir (Sandstone)	200 – 8000
Batu Tulis (Shales)	20 – 2000
Pasir (Sand)	1 - 1000
Lempung (Clay)	1 – 100
Air Tanah (Ground Water)	0.5 – 300
Air Asin (Sea Water)	0.2
Magnetit (Magnetit)	0.01 – 1000
Kerikil Kering (Dry Gravel)	600 – 10000
Aluvium (Alluvium)	10 – 800

Prinsip dasar metode resistivitas adalah Hukum Ohm, yang ditemukan oleh Georg Simon Ohm pada tahun 1827, adalah salah satu prinsip dasar dalam teori listrik yang menggambarkan hubungan antara tegangan, arus, dan hambatan dalam suatu rangkaian listrik. Hukum ini menyatakan bahwa besar arus yang mengalir melalui penghantar berbanding lurus dengan tegangan yang diterapkan dan berbanding terbalik dengan hambatan penghantar tersebut. Secara matematis, hukum Ohm ditulis sebagai:

$$V = I \cdot R \quad (1)$$

di mana V adalah tegangan (dalam volt), I adalah kuat arus (dalam ampere), dan R adalah hambatan (dalam ohm) (Saputri et al., 2025).

1.3.4.1 Potensial pada Bumi Homogen Isotropis

Metode geolistrik tahanan jenis didasarkan pada anggapan bahwa bumi mempunyai sifat homogen isotropis. Ketika arus listrik kontinu dialirkan ke dalam medium homogen isotropik, elemen arus (dI) yang melintasi elemen luas permukaan (dA) didefinisikan sebagai (Telford et al., 1990):

$$dI = \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

Hubungan ini menggambarkan keterkaitan antara rapat arus $\vec{j}$ dan medan listrik $\vec{E}$, sesuai dengan hukum Ohm, yang dirumuskan dalam persamaan:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

Di mana $\vec{J}$ merupakan rapat arus (A/m^2), σ adalah konduktivitas medium (S/m) sebagai kebalikan resistivitas, dan $\vec{E}$ adalah medan listrik (V/m). Medan listrik ini didefinisikan sebagai gradien negatif dari potensial skalar V , sehingga :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (4)$$

Dimana V adalah potensial listrik, substitusikan persamaan (4) ke persamaan (3) maka diperoleh persamaan :

$$\vec{J} = -\sigma \vec{\nabla}V \quad (5)$$

Gradien menggambarkan laju perubahan suatu fungsi terhadap koordinat. Pada kondisi arus stasioner di mana tidak terjadi akumulasi atau kehilangan arus, maka berlaku persamaan kontinuitas :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (6)$$

Maka,

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla}V) = 0 \quad (7)$$

Atau

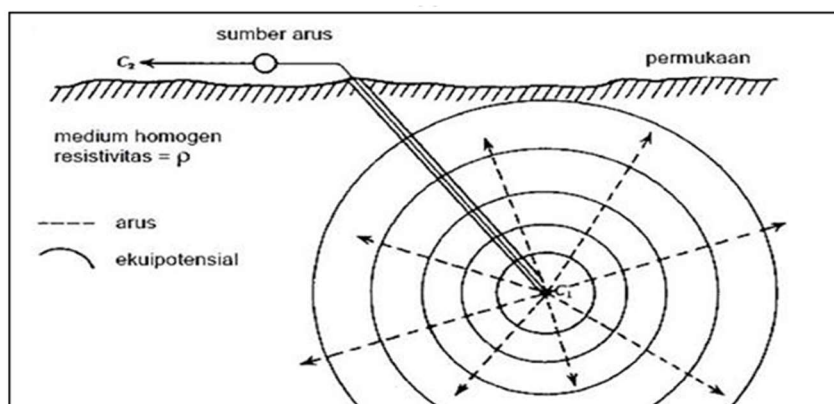
$$\vec{\nabla}\sigma \cdot \vec{\nabla}V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (8)$$

Pada medium homogen isotropis, σ bersifat konstan sebagai koefisien tetap di seluruh titik medium, sehingga tidak memengaruhi distribusi arus yang mengalir. Akibatnya, suku pertama pada persamaan (9) menjadi nol, sehingga diperoleh persamaan yang dituliskan sebagai :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (9)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan dasar teori geolistrik tahanan jenis.

1.3.4.2 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di dalam Bumi



Gambar 2. Sumber arus Tunggal di dalam bumi (Telford et al., 1990)

Dalam model homogen isotropis, elektroda arus ditanamkan ke dalam bumi berfungsi sebagai sumber injeksi arus listrik yang merambat ke segala arah, sebagaimana

diilustrasikan pada Gambar 2. Setiap titik equipotensial membentuk permukaan bola yang memenuhi persamaan Laplace dalam koordinat bola (r, θ, ϕ) sebagai berikut (Telford et al., 1990):

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (10)$$

Setiap titik equipotensial di dalam bumi membentuk permukaan bola dengan jari-jari r , sehingga total arus yang keluar melalui luas permukaan bola tersebut konstan untuk jari-jari r . Dalam sistem koordinat bola yang diamati dari pusat, simetri bola menghasilkan turunan terhadap sudut θ dan ϕ pada persamaan bernilai nol, sehingga persamaan Laplace dapat disederhanakan menjadi bentuk radial :

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0 \quad (11)$$

Dengan melakukan integrasi sebanyak dua kali terhadap persamaan (11), maka diperoleh:

$$\int \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = \int 0 \rightarrow \frac{d}{dr} r^2 \frac{dV}{dr} = A \rightarrow \frac{dV}{dr} = \frac{A}{r^2} \quad (12)$$

$$V = \int \frac{A}{r^2} dr = -\frac{A}{r} + B \quad (13)$$

di mana A dan B adalah konstanta integrasi. Ketika jarak titik pengukuran mendekati tak hingga dari sumber ($r \rightarrow \infty$), potensial menjadi nol ($V = 0$), sehingga konstanta $B = 0$. Dengan demikian, persamaan (13) disederhanakan menjadi berikut:

$$V = -\frac{A}{r} \quad (14)$$

Untuk sumber arus titik dalam medium bumi homogen isotropis, permukaan equipotensial berbentuk bola. Total arus I yang menembus permukaan equipotensial tersebut yaitu : $I = A \vec{j}$, dengan luas permukaan bola sebesar $4\pi r^2$, sehingga menghasilkan persamaan :

$$I = 4\pi r^2 (-\sigma \vec{\nabla} V) \quad (15)$$

Karena V dalam fungsi $r \rightarrow \vec{\nabla} V = \frac{dV}{dr}$. Sehingga persamaan 12 disubstitusikan ke persamaan (15) maka:

$$I = 4\pi r^2 \sigma \frac{A}{r^2} = -4\pi \sigma A \quad (16)$$

Dengan hubungan $\sigma = 1/\rho$, persamaan (17) menjadi:

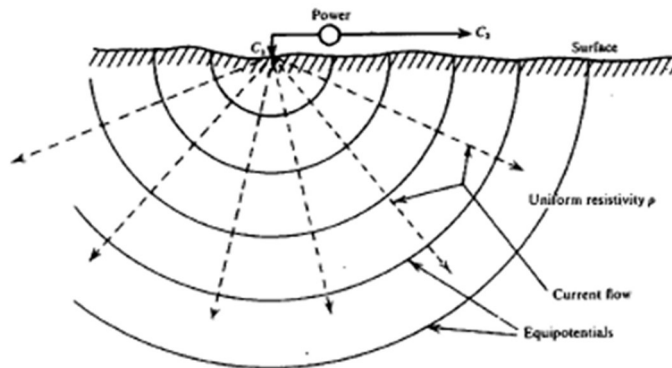
$$I = -4\pi \frac{1}{\rho} A \rightarrow A = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (17)$$

Substitusi nilai A ini ke persamaan potensial memperoleh rumus akhir:

$$V = \left(\frac{I\rho}{4\pi} \right) \frac{1}{r} \quad (18)$$

Dimana V adalah potensial listrik (V), I kuat arus (A), ρ resistivitas (Ωm), $\vec{j}$ rapat arus (A/m^2), dan σ konduktivitas (S/m).

1.3.4.3 Potensial Listrik Akibat Arus Tunggal di Permukaan Bumi

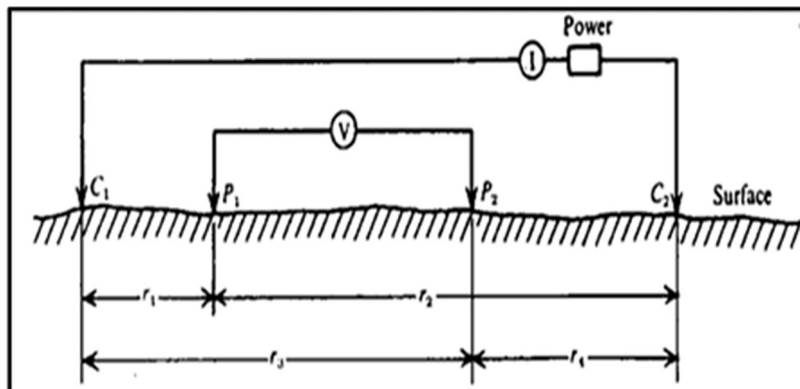


Gambar 3. Sumber arus tunggal pada permukaan bumi (Telford et al., 1990)

Apabila sumber arus berada di permukaan medium homogen yang membentuk setengah ruang (half-space) dengan medium atasnya adalah udara ($\sigma_{\text{udara}} = 0$) seperti pada Gambar 3, luas permukaan equipotensial menjadi $2\pi r^2$ dan potensial pada persamaan dimodifikasi menjadi (Telford et al., 1990):

$$V = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \frac{1}{r} \quad (19)$$

1.3.4.4 Potensial Dua Elektroda pada Permukaan Bumi



Gambar 4. Dua elektroda arus dan potensial di permukaan medium homogen isotropis (Telford et al., 1990)

Distribusi potensial listrik akibat dua sumber arus dalam medium bumi homogen, dengan jarak antar elektroda arus tetap. Gambar 4, mengilustrasikan konfigurasi elektroda potensial P_1 , P_2 dan elektroda arus C_1 , C_2 , di mana r_1, r_2, r_3, r_4 menunjukkan jarak antar posisi elektroda. Ketika jarak antar elektroda arus dibatasi di permukaan, keduanya berkontribusi terhadap nilai potensial permukaan. Potensial total di titik P_1 merupakan superposisi pengaruh dari arus C_1 dan C_2 adalah (Telford et al., 1990) :

$$V_1 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (20)$$

Potensial total di titik P_2 akibat kontribusi arus dari C_1 dan C_2 diberikan oleh :

$$V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (21)$$

Beda potensial antara P_1 dan P_2 diperoleh dari:

$$\Delta V = V_1 - V_2 \rightarrow \Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (22)$$

Dari persamaan , resistivitas dihitung sebagai:

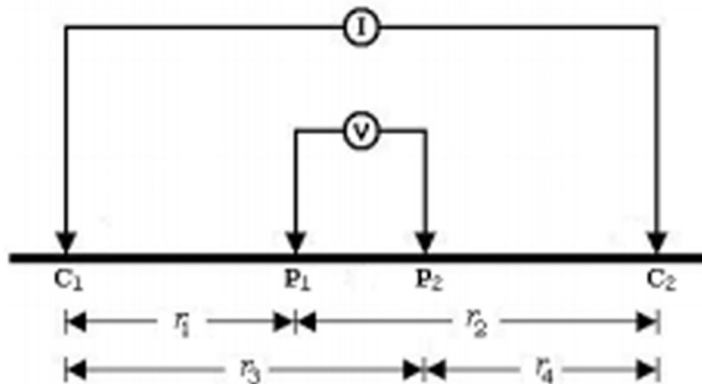
$$\rho = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]} \frac{\Delta V}{I} \quad (23)$$

atau secara umum $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$, dengan faktor geometri:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]} \quad (24)$$

1.3.4.5 Konfigurasi Wenner- Alpha

Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh *Wenner- Alpha* (1915). Konfigurasi *Wenner- Alpha* sering digunakan dalam survei geolistrik dengan spasi elektroda sama panjang ($r_1 = r_4 = a$ dan $r_2 = r_3 = 2a$). Jarak antar elektroda arus tiga kali jarak elektroda potensial, jarak potensial ke titik sounding adalah $a/2$, sedangkan jarak elektroda arus ke titik sounding $2a/3$. Kedalaman penetrasi efektif metode ini mencapai $2a$. Saat pengukuran lapangan, elektroda arus dan potensial ditempatkan secara simetris terhadap titik sounding (Wijaya, 2015).



Gambar 5. Susunan elektroda konfigurasi Wenner (Setiawan et al., 2023)

Pada konfigurasi *Wenner- Alpha* , jarak antar elektroda arus dan potensial bersifat sama secara simetris. Berdasarkan Gambar 5, jarak $AM = NB = a$ dan $AN = MB = 2a$. Menggunakan persamaan umum (24) atau faktor geometri diperoleh sebagai:

$$K = 2 \pi a \quad (25)$$

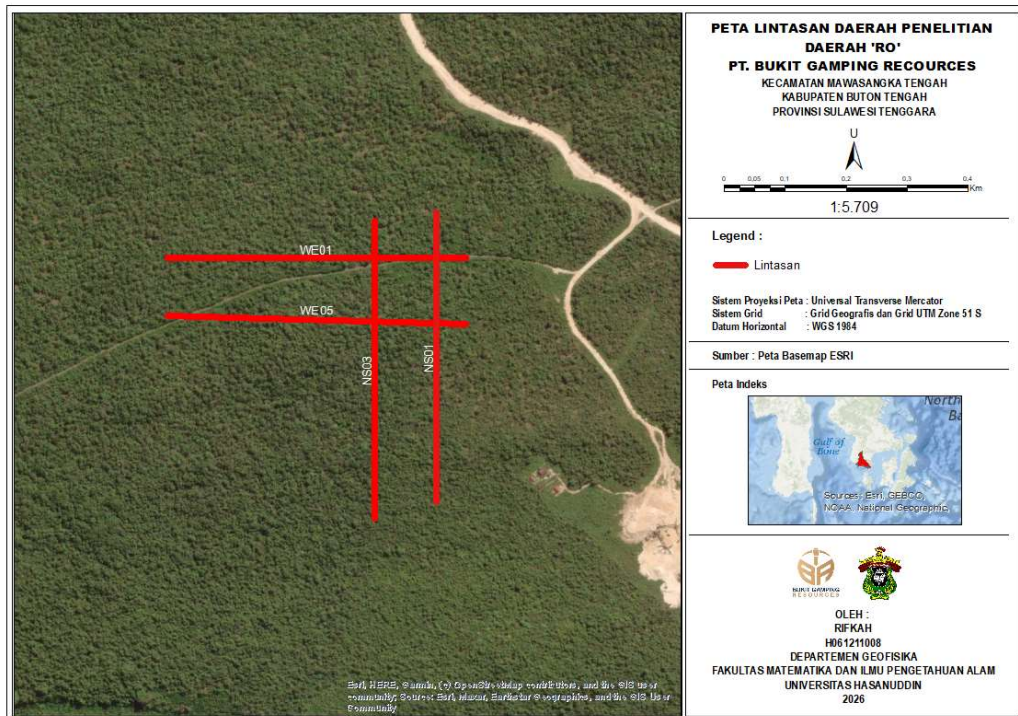
Dengan demikian, faktor geometri konfigurasi *Wenner- Alpha* adalah $K_w = 2\pi a$, sehingga resistivitas dihitung sebagai :

$$\rho_w = K_w \frac{\Delta V}{I} \quad (26)$$

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak di area 'RO' pada blok GE wilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP) PT. Bukit Gamping Resources, Kecamatan Mawasangka Tengah, Kabupaten Buton Tengah, Provinsi Sulawesi Tenggara yang dapat dilihat pada gambar 6 :



Gambar 6. Lokasi penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Adapun alat-alat yang digunakan dalam akuisisi metode *Electricity Resistivity Tomography* (ERT) adalah:

1. *Resistivitymeter Gomatic GD20 Supreme*
2. 100 elektroda
3. Palu
4. 12 kabel golistik 100 meter
5. 12 *switch relay* (konektor)
6. Baterai BP-450
7. 3 *Handy Talkie* (HT)
8. Ponsel (*Avenza Maps*)

Adapun rangkaian alat yang digunakan dalam pengolahan data sebagai berikut.

1. *Software Res2DInv 4.10.20*

2. *Software Notepad*
3. *Software Microsoft Excel*

2.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa yang terdiri dari:

1. Data *Electrivity Resistivity Tomography* (ERT)
Data hasil pengukuran yang diperoleh hasil pengukuran adalah hasil arus (I), beda potensial (V) dan jarak spasi (n).

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Tahap Kajian Pustaka

Tahapan kajian pustaka dilakukan sebagai langkah awal dalam penelitian ini dengan mengumpulkan berbagai literatur yang berkaitan dengan geologi regional daerah studi, proses pembentukan batugamping, karakteristik batugamping pada lokasi penelitian, keterkaitan antara nilai resistivitas dengan kondisi geologi setempat, serta informasi relevan lainnya yang mendukung proses interpretasi data hingga estimasi volume lapisan batugamping.

2.3.2 Tahap Pengukuran

Pengambilan data *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) di lapangan dilakukan sebanyak 4 lintasan, yang terdiri atas 2 lintasan berarah utara–selatan dan 2 lintasan berarah timur–barat. Setiap lintasan memiliki panjang 495 m dimana jarak antar lintasan 100 meter menggunakan konfigurasi *Wenner- Alpha* serta spasi elektroda sebesar 5 m. Adapun tahapan dalam proses akuisisi data tersebut adalah sebagai berikut:

1. Menentukan lintasan sepanjang 495 meter, memasang tanda, dan membersihkan jalur dari hambatan dilakukan sebagai tahap awal, dengan mengacu pada peta lintasan yang telah dirancang sebelumnya. Penandaan dilakukan setiap 10–20 m menggunakan pita ukur untuk memastikan lintasan tetap lurus. Setelah itu, jalur lintasan dibersihkan dari vegetasi atau rintangan menggunakan parang atau golok agar proses pemasangan elektroda dapat dilakukan tanpa hambatan.
2. Memasang 100 elektroda dengan jarak seragam dan memastikan konduktivitas tanah optimal dilakukan dengan menyusun elektroda secara berurutan sepanjang lintasan, masing-masing berjarak 5 meter. Untuk memastikan akurasi pengukuran, tanah di sekitar elektroda dijaga kelembapannya guna meminimalkan resistansi kontak dan menjaga kualitas konduksi listrik.
3. Menghubungkan elektroda ke perangkat geolistrik dan mengatur konfigurasi Wenner dilakukan dengan menyambungkan seluruh elektroda ke alat *Geomatic GD-20* menggunakan kabel *multichannel*. Setelah itu, konfigurasi pengukuran diatur pada perangkat dengan memilih metode Wenner Alpha yang sesuai untuk survei tahanan jenis 2D.
4. Menjalankan perangkat untuk mengukur arus dan tegangan secara sistematis di sepanjang lintasan dilakukan dengan mengaktifkan sistem akuisisi data pada alat *Geomatic GD-20*. Perangkat kemudian secara otomatis mengirim arus listrik dan mengukur beda potensial antar kombinasi elektroda sesuai dengan konfigurasi yang telah ditentukan.

5. Menyimpan dan memeriksa data untuk memastikan kelayakannya sebelum melepas alat dilakukan setelah seluruh pengukuran selesai. Data yang telah direkam ditinjau kembali untuk memastikan tidak terdapat kesalahan atau anomali. Data yang valid kemudian disimpan dalam format digital untuk keperluan pengolahan dan interpretasi lebih lanjut.
6. Melepas semua peralatan, membersihkan lokasi, dan mengembalikan kondisi lingkungan seperti semula dilakukan dengan mencabut elektroda dan menggulung kabel secara sistematis. Setelah semua peralatan dikemas, lokasi pengukuran dibersihkan dan dikembalikan ke kondisi semula sebagai bentuk tanggung jawab terhadap lingkungan.

2.3.3 Tahap Pengolahan Data

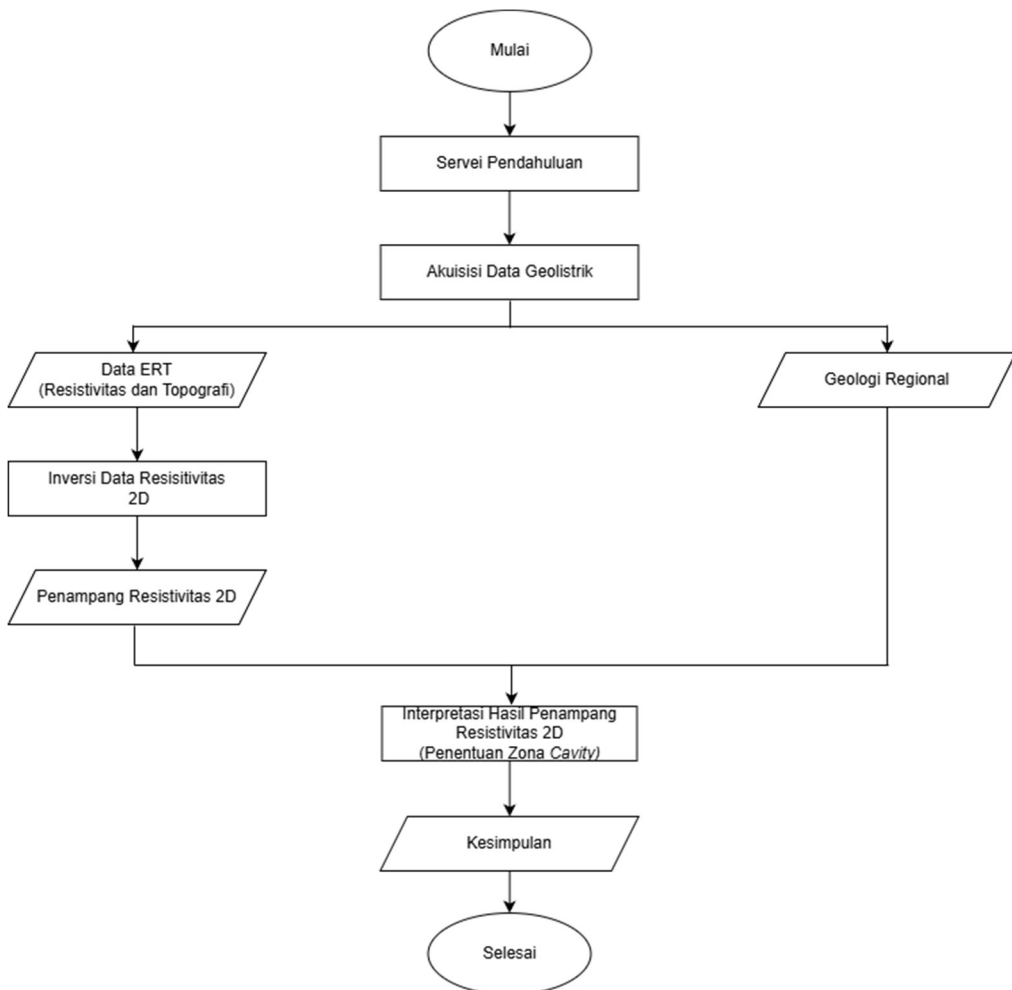
Data hasil pengukuran di lapangan berupa beda potensial dan arus listrik digunakan untuk menghitung nilai resistivitas semu. Nilai ini belum mencerminkan kondisi sebenarnya di bawah permukaan, sehingga perlu dilakukan proses inversi menggunakan perangkat lunak *Res2DInv*. Sebelum proses inversi dilakukan, terlebih dahulu dilakukan penyesuaian format data menjadi file berformat .dat yang memuat informasi hasil pengukuran, data topografi, dan koordinat global sesuai dengan format yang dapat dibaca oleh *Res2DInv*. Selanjutnya, pada perangkat lunak *Res2DInv*, dilakukan pengaturan parameter inversi seperti nilai *rasio smoothness* (iterasi), yang disesuaikan dengan karakteristik data lapangan serta kebijakan teknis dari instansi atau perusahaan. Setelah parameter inversi ditentukan, proses inversi dilakukan untuk menghasilkan penampang 2D resistivitas bawah permukaan pada masing-masing lintasan. Pada setiap penampang kemudian dilakukan quality control data melalui nilai *RMS Error*; data dengan nilai error terlalu tinggi dianalisis ulang untuk menentukan apakah termasuk anomali geologi atau kesalahan pengukuran. Jika ditemukan data yang tidak valid, maka data tersebut dapat dihapus secara selektif dengan mempertimbangkan informasi di sekitar titik tersebut agar tidak menghilangkan pola geologi yang penting. Setelah hasil inversi dinyatakan layak, dilakukan proses interpretasi penampang.

2.3.4 Interpretasi Data

Proses interpretasi dimulai dengan menganalisis penampang resistivitas untuk mengenali keberadaan rongga (*cavity*) pada batugamping menggunakan *software Res2DInv*. Sebelum melakukan interpretasi, diperlukan pemahaman yang baik terhadap kondisi geologi lokasi penelitian, termasuk tingkat pelapukan batuan karbonat, keberadaan struktur geologi bawah permukaan, jenis batuan penyusun, sifat porositas dan permeabilitas batuan, serta informasi geologi penting lainnya. Seluruh informasi ini sangat berguna dalam menentukan batas zona anomali berdasarkan perbedaan nilai resistivitas yang terukur.

Langkah selanjutnya adalah membuat model inversi 2D dari data geolistrik untuk menampilkan sebaran resistivitas bawah permukaan dengan lebih detail. Setelah mendapatkan nilai resistivitas kemudian mengkorelasikan dengan data nilai resistivitas yang ada pada literatur dan disesuaikan dengan geologi daerah penelitian.

2.4 Bagan Alir



Gambar 7. Bagan alir