



Studi Eksperimen Skala Laboratorium Respons Distribusi Beda Potensial Metode *Mise a la Masse* pada Model Sungai Bawah Tanah

Roma Widiyansari^{1*}

¹ Departemen Pendidikan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3147>

Article Info:

Received : 28 Juli 2026
Revised : 19 Agustus 2026
Accepted : 29 Agustus 2026
Published : 18 September 2026

Correspondence:

Roma Widiyansari

Phone:

Abstract: Laboratory-scale experiments were conducted to investigate the response of electrical potential difference distribution to conductive-body geometry using the *Mise à la Masse* (MALM) method. Characterizing subsurface conductive pathways is important for understanding groundwater systems, particularly in areas where underground rivers may serve as water resources. However, the heterogeneous nature of natural subsurface conditions requires controlled laboratory experiments to understand the basic MALM response. Two conductor geometries, straight and two-branch models, were tested in relatively homogeneous dry and wet sand media. Potential differences were measured at observation points around the models and visualized as contour maps. The results show distinct potential distribution patterns associated with medium conditions and conductor geometry. Wet-sand models produced more continuous and relatively smoother potential distributions, making the conductive-body geometry more readily recognizable than in dry sand. The two-branch conductor generated a more complex potential pattern than the straight conductor, indicating that conductor geometry influences the surrounding potential field. These results demonstrate the capability of MALM to characterize conductive-body responses under controlled laboratory conditions and its potential for delineating underground river pathways. Further experiments using heterogeneous media and more realistic subsurface conditions are needed to evaluate its field applicability.

Keywords: Geoelectrical Method; *Mise a la Masse*; Underground River; Electrical Potential Difference Distribution

Citation: Widiyansari, R. (2026). Studi Eksperimen Skala Laboratorium Respons Distribusi Beda Potensial Metode *Mise a la Masse* pada Model Sungai Bawah Tanah. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(4), 5518–5525. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3147>

Pendahuluan

Keberadaan sungai bawah tanah yang pada umumnya ditemukan di lingkungan karst, dapat menjadi sumber mata air bersih dan irigasi bagi warga sekitar pada musim kemarau, contohnya di daerah Gunung Kidul yang sering terjadi kekeringan.

Sistem aliran air bawah permukaan pada kawasan karst berkembang melalui rekahan, rongga, dan saluran pelarutan yang dapat membentuk jalur aliran dengan geometri yang kompleks. Keberadaan sistem aliran bawah tanah dapat berkaitan dengan fitur permukaan seperti *sinkhole* (luweng), yang pada kondisi tertentu berperan sebagai zona masuknya air ke dalam

sistem karst. Namun, keberadaan *sinkhole* tidak secara langsung menunjukkan posisi atau geometri sungai bawah tanah, karena aliran dapat berkembang mengikuti rekahan dan saluran pelarutan yang berada di bawah permukaan.

Oleh karena itu, geometri jalur aliran bawah permukaan tidak mudah diketahui secara langsung dari permukaan. Informasi mengenai geometri jalur aliran tersebut diperlukan untuk mendukung karakterisasi sistem hidrogeologi. Metode geofisika dapat digunakan sebagai pendekatan non-invasif untuk memperoleh informasi mengenai kondisi bawah permukaan tersebut. Metode *Mise a la Masse* (MALM) merupakan salah satu

metode geolistrik aktif yang dapat digunakan untuk memetakan badan konduktif, apabila sebagian telah ditemukan. Pada metode ini, salah satu elektroda arus dihubungkan secara langsung dengan badan konduktif yang menjadi target, sedangkan elektroda arus lainnya ditempatkan pada lokasi yang relatif jauh dari target. Arus listrik yang diinjeksikan ke badan konduktif akan menyebar melalui medium di sekitarnya dan menghasilkan distribusi potensial listrik. Pengukuran beda potensial pada sejumlah titik pengamatan kemudian dapat digunakan untuk menggambarkan pola medan potensial dan memberikan informasi mengenai posisi serta geometri badan konduktif. Karakteristik anomali MALM dipengaruhi oleh kontras konduktivitas, geometri target, posisi elektroda, dan sifat medium di sekitarnya.

Aplikasi MALM telah berkembang dari eksplorasi zona mineralisasi (e.g. PARASNIS, 2006; Gupta, 2007; Singh & Banglani, 2009) menjadi berbagai permasalahan yang melibatkan zona konduktif di bawah permukaan. Metode ini antara lain telah digunakan untuk menginvestigasi sungai bawah tanah (Chen et al., 2023; Gan et al., 2017; Pant, 2004), zona akuifer konduktif (Perri et al., 2018; Perrin et al., 2019), mendeteksi kebocoran reservoir air (Ling et al., 2019), kebocoran tempat pembuangan akhir (Mary et al., 2022), serta manifestasi panas bumi (Mustopa et al., 2016). Pada kajian hidrogeologi, distribusi beda potensial yang dihasilkan oleh MALM dapat memberikan informasi mengenai keberadaan dan kontinuitas zona konduktif yang berkaitan dengan air bawah permukaan. MALM dapat digunakan untuk mengkarakterisasi struktur konduktif dengan geometri yang kompleks (Mary et al., 2018). Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa respons medan potensial terhadap bentuk dan kondisi badan konduktif merupakan aspek penting dalam interpretasi data MALM.

Meskipun demikian, interpretasi respons MALM pada kondisi lapangan dapat menjadi kompleks karena medium bawah permukaan pada umumnya tidak homogen. Variasi litologi, porositas, kandungan air, tingkat kejenuhan, rekahan, dan konduktivitas listrik dapat menyebabkan perubahan distribusi arus dan potensial di sekitar badan konduktif. Selain itu, geometri badan konduktif yang kompleks dapat menghasilkan pola distribusi potensial yang berbeda dibandingkan dengan badan konduktif yang sederhana.

Kondisi tersebut dapat menyulitkan identifikasi hubungan antara pola anomali potensial dan bentuk target secara langsung. Oleh karena itu, eksperimen dengan menggunakan model fisik yang terkontrol diperlukan untuk memahami respons dasar MALM sebelum diterapkan pada kondisi nyata di lapangan yang lebih kompleks. Mu'in et al. (2024) melakukan eksperimen skala laboratorium dengan menginjeksikan

fluida ke dalam model bawah permukaan dan mengombinasikan metode SP, ERT, dan MALM untuk mengidentifikasi respons listrik akibat keberadaan dan pergerakan fluida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ERT mampu mengidentifikasi zona yang mengalami peningkatan saturasi air melalui perubahan resistivitas, sedangkan respons SP dan MALM memberikan informasi tambahan terkait keberadaan badan konduktif dan distribusi fluida.

Meskipun demikian, penelitian tersebut lebih menekankan respons listrik terhadap injeksi dan pergerakan fluida, sementara pengaruh geometri badan konduktif terhadap pola distribusi beda potensial MALM secara sistematis masih belum banyak dikaji melalui eksperimen terkontrol. Selain itu, pengaruh kondisi medium, khususnya perbedaan antara medium pasir kering dan basah, terhadap keterbacaan pola potensial juga perlu dikaji lebih lanjut. Eksperimen skala laboratorium memungkinkan hubungan antara geometri badan konduktif, kondisi medium, dan distribusi potensial dikaji dengan lebih terkontrol. Posisi dan bentuk target dapat ditentukan terlebih dahulu sehingga pola beda potensial hasil pengukuran dapat dibandingkan dengan geometri target yang sebenarnya. Pendekatan tersebut juga memungkinkan pengaruh kondisi medium dipelajari secara sistematis. Pada tahap awal, penggunaan medium yang relatif homogen dapat meminimalkan pengaruh heterogenitas sehingga perubahan pola potensial dapat lebih mudah dikaitkan dengan karakteristik badan konduktif. Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini mengkaji respons distribusi beda potensial metode MALM terhadap variasi geometri konduktor, yaitu model lurus dan bercabang, pada medium pasir kering dan basah. Pendekatan ini menjadi kebaruan penelitian karena memungkinkan pengaruh geometri konduktor dan kondisi medium terhadap pola potensial dikaji secara terpisah dan terkontrol sebagai dasar untuk memahami kemampuan MALM dalam mendelineasi jalur konduktif bawah permukaan.

Dalam penelitian ini, sungai bawah tanah disederhanakan sebagai model badan konduktif menggunakan kawat tembaga. Kawat tembaga digunakan karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi sehingga dapat menghasilkan kontras sifat listrik terhadap medium pasir di sekitarnya. Dua bentuk geometri digunakan untuk merepresentasikan variasi jalur sungai bawah tanah, yaitu konduktor lurus dan konduktor bercabang dua. Model lurus digunakan sebagai representasi sederhana jalur sungai yang relatif linear, sedangkan model bercabang digunakan untuk merepresentasikan sistem jalur yang mengalami percabangan. Kedua model ditempatkan dalam medium pasir yang relatif homogen. Untuk mengkaji pengaruh kondisi medium, eksperimen dilakukan pada pasir

kering dan pasir basah. Perbedaan kondisi tersebut digunakan untuk mengamati perubahan karakteristik distribusi beda potensial ketika konduktivitas medium berubah. Pengukuran dilakukan menggunakan metode MALM dengan satu sumber arus dan empat elektroda, yang terdiri atas dua elektroda arus dan dua elektroda potensial. Data beda potensial pada titik-titik pengamatan kemudian diolah menjadi peta kontur untuk menggambarkan distribusi potensial di sekitar model konduktif.

Eksperimen ini masih menggunakan medium pasir yang relatif homogen dan geometri badan konduktif yang disederhanakan. Kondisi tersebut berbeda dengan lingkungan bawah permukaan sebenarnya yang umumnya memiliki heterogenitas litologi dan variasi sifat fisik yang lebih kompleks. Oleh karena itu, hasil penelitian ini tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan kondisi sungai bawah tanah secara langsung, tetapi sebagai eksperimen dasar untuk memahami respons MALM terhadap variasi geometri badan konduktif pada medium yang terkontrol. Hasil ini selanjutnya dapat menjadi dasar untuk pengembangan model eksperimen yang lebih kompleks, misalnya dengan menggunakan medium berlapis atau heterogen, variasi tingkat kejenuhan, serta model konduktif dengan geometri yang lebih mendekati sistem sungai bawah tanah sebenarnya.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji respons distribusi beda potensial metode MALM terhadap variasi geometri badan konduktif berupa model lurus dan bercabang dua pada medium pasir kering dan basah, serta mengevaluasi kemampuan pola distribusi potensial dalam menggambarkan geometri model konduktif sebagai representasi sederhana sungai bawah tanah.

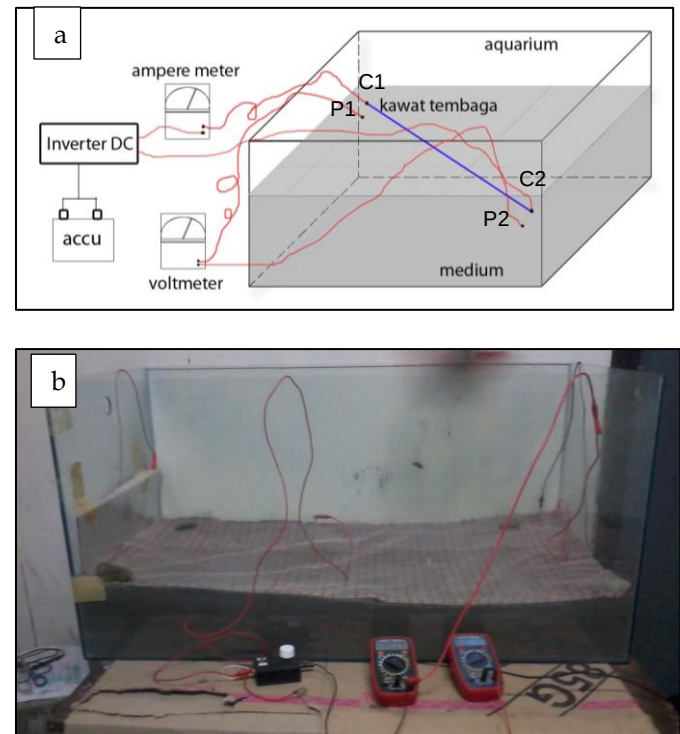
Metode

Desain Eksperimen

Penelitian ini merupakan eksperimen fisik skala laboratorium yang bertujuan untuk mengkaji respons distribusi beda potensial metode MALM terhadap variasi geometri badan konduktif dan kondisi medium. Badan konduktif yang digunakan berupa kawat tembaga yang memiliki konduktivitas listrik tinggi sebagai representasi sederhana dari jalur sungai bawah tanah. Pada metode MALM, elektroda pengirim arus (C1) diletakkan pada badan konduktif yang akan dicari penyebarannya dan pada posisi yang tetap. Dengan menginjeksikan arus pada zona konduktif itu sendiri, maka indikasi penyebaran zona konduktif akan terlihat lebih jelas dibandingkan dengan menginjeksikan arus di luar zona konduktif.

Elektroda arus ke dua (C2) diletakkan jauh dari elektroda arus pertama. Sedangkan untuk elektroda potensial pertama (P1) diletakkan dekat dengan

elektroda arus pertama (posisi tetap) dan elektroda potensial kedua (P2) posisinya berubah-ubah sesuai dengan titik-titik pengukuran (Gambar 1).



Gambar 1. Desain eksperimen metod MALM skala laboratorium: skema konfigurasi elektroda dan rangkaian pengukuran (atas) dan realisasi eksperimen pada medium dalam akuarium (bawah).

Eksperimen dilakukan pada badan konduktif dengan dua variasi yaitu bentuk kawat tembaga lurus yang merepresentasikan sungai bawah tanah yang relatif linear dan kawat tembaga bercabang dua yang merepresentasikan sungai dengan percabangan. Pasir digunakan sebagai medium eksperimen karena dapat menghasilkan model bawah permukaan yang relatif sederhana dan mudah dikontrol. Eksperimen dilakukan dalam dua kondisi medium, yaitu pasir kering dan pasir basah.

Kondisi pasir kering digunakan sebagai kondisi dengan kandungan air yang relatif rendah, sedangkan kondisi pasir basah digunakan untuk menghasilkan perubahan sifat kelistrikan medium akibat keberadaan air pada ruang pori. Pada penelitian ini medium dianggap relatif homogen, sehingga perubahan pola distribusi beda potensial terutama dianalisis berdasarkan variasi geometri konduktor dan kondisi medium. Penggunaan medium homogen merupakan penyederhanaan dari kondisi bawah permukaan sebenarnya yang umumnya bersifat heterogen. Secara keseluruhan, desain eksperimen terdiri atas empat model, yaitu: Dari variasi badan konduktor dan

medium, diukur nilai besar potensial di setiap grid pada permukaan medium pasir yang diasumsikan sebagai lapangan penelitian yang datar. Besar potensial yang terukur selanjutnya digunakan untuk pembuatan peta kontur beda potensial untuk mengetahui persebaran model sungai bawah tanah.

Tabel 1. Variabel eksperimen

Model	Medium	Geometri Konduktor
Model 1	Pasir kering	Lurus
Model 2	Pasir kering	Bercabang dua
Model 3	Pasir Basah	Lurus
Model 4	Pasir Basah	Bercabang dua

Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: akuarium kaca ukuran 100 cm x 50 cm; pasir kering dan basah; kawat tembaga; 1 buah aki 100 Ampere; 1 buah multimeter resolusi tinggi untuk mengukur besar potensial; 1 buah multimeter resolusi tinggi untuk mengukur besar arus; pengisi daya aki; kabel penghubung; soket dan caput buaya; benang untuk membuat grid; dan meja.

Langkah – Langkah Penelitian

Langkah pertama yang dilakukan adalah mengisi akuarium dengan medium pasir kering, kemudian membuat grid dengan benang di atas medium pasir tersebut dengan ukuran 2 cm x 2 cm untuk memudahkan menghitung titik-titik koordinat pengukuran. Langkah selanjutnya adalah menghubungkan sumber arus dengan elektoda pengirim arus (kawat tembaga); menghubungkan multimeter resolusi tinggi ke sumber listrik untuk mengukur besar potensial; meletakkan kawat tembaga lurus sebagai model pertama, mengukur besar potensial pada setiap grid; dan mencatat besar potensial yang didapat. Lakukan hal yang sama pada kawat bercabang, kemudian ganti medium pasir kering dengan pasir basah dan lakukan pengukuran ulang dengan 2 model konduktor yang sama. Setelah mendapatkan data besar beda potensial pada setiap titik, kemudian data diolah dan dianalisis.

Pengolahan dan Analisis Data

Pada setiap titik pengukuran, beda potensial antara P1 dan P2 dicatat sebagai:

$$\Delta V = V_{P1} - V_{P2}$$

Posisi setiap titik pengukuran dicatat dalam koordinat x dan y , sehingga setiap data pengukuran terdiri atas: $(x_i, y_i, \Delta V_i)$. Data ini akan digunakan untuk membangun distribusi spasial beda potensial. Distribusi

beda potensial kemudian diinterpolasi pada grid dua dimensi untuk menghasilkan peta kontur. Secara matematis, data hasil pengukuran dapat dinyatakan sebagai: $\Delta V_i = f(x_i, y_i)$. Interpolasi digunakan untuk memperkirakan nilai beda potensial pada lokasi yang tidak diukur secara langsung sehingga diperoleh distribusi spasial yang lebih kontinu. Hasil interpolasi kemudian divisualisasikan dalam bentuk peta kontur beda potensial.

Peta kontur digunakan untuk membandingkan:

1. Distribusi potensial pada model konduktor lurus dan bercabang;
2. Distribusi potensial pada pasir kering dan basah;
3. Perubahan pola potensial di sekitar geometri konduktif;
4. Kesesuaian pola distribusi potensial dengan posisi model konduktif yang sebenarnya.

Interpretasi dilakukan dengan membandingkan pola kontur hasil pengukuran dengan posisi dan geometri kawat tembaga yang telah diketahui sebelumnya.

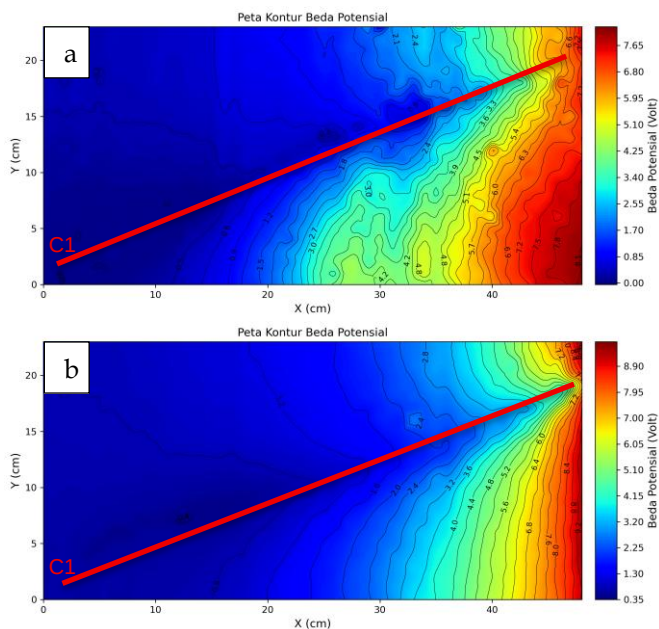
Analisis data dilakukan secara komparatif berdasarkan dua variabel utama, yaitu geometri konduktor dan kondisi medium. Untuk pengaruh geometri, hasil model lurus dibandingkan dengan model bercabang pada kondisi medium yang sama. Perubahan pola kontur kemudian diamati untuk mengetahui apakah percabangan konduktor menghasilkan karakteristik distribusi potensial yang berbeda dari konduktor lurus.

Untuk pengaruh kondisi medium, hasil pada pasir kering dibandingkan dengan pasir basah untuk geometri konduktor yang sama. Analisis difokuskan pada perubahan kontinuitas pola kontur, gradien potensial, dan keterlihatan pola yang berkaitan dengan posisi model konduktif. Dengan pendekatan tersebut, analisis tidak hanya didasarkan pada nilai beda potensial secara individual, tetapi juga pada pola spasial distribusi potensial.

Hasil dan Diskusi

Distribusi Beda Potensial pada Model Konduktor Lurus

Hasil pengukuran beda potensial pada model konduktor lurus di tunjukkan pada Gambar 2. Bagian dengan nilai beda potensial rendah ditunjukkan oleh warna biru, sedangkan nilai yang lebih tinggi ditunjukkan oleh warna hijau, kuning, hingga merah. Peta kontur menunjukkan pola yang relatif mengikuti geometri badan konduktor, dengan nilai beda potensial meningkat secara gradual dari bagian kiri yang dekat dengan sumber arus menuju bagian kanan model.



Gambar 2. Peta kontur beda potensial pada model konduktor lurus dengan medium pasir kering (a) dan medium pasir basah (b). C1 merupakan posisi elektroda sumber arus dan garis merah merupakan badan konduktor. Terlihat pola kontur yang relatif mengikuti badan konduktor dari beda potensial rendah yang dekat dengan sumber arus ke beda potensial tinggi yang semakin jauh dari sumber arus.

Gambar 2a menunjukkan distribusi beda potensial konduktor lurus dalam medium pasir kering. Nilai maksimum yang terukur pada model ini mencapai sekitar 8,1 V. Pola distribusi beda potensial menunjukkan adanya gradien potensial yang relatif kontinu pada medium. Kontur beda potensial pada bagian tengah hingga kanan model cenderung memanjang mengikuti arah badan konduktor. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberadaan badan konduktif yang terhubung dengan elektroda arus memengaruhi distribusi medan listrik di sekitarnya. Pada beberapa lokasi terlihat adanya penyimpangan dari pola kontur yang relatif halus, yang dapat berkaitan dengan respons lokal terhadap posisi badan konduktif maupun kondisi pengukuran.

Pada model konduktor lurus, pola potensial relatif lebih sederhana dibandingkan model bercabang (Gambar 3). Hal ini sesuai dengan geometri target yang digunakan. Konduktor dengan geometri linear menghasilkan distribusi medan potensial yang relatif teratur karena jalur konduktif tidak mengalami perubahan arah atau percabangan yang signifikan. Dengan demikian, eksperimen ini menunjukkan bahwa bentuk geometri badan konduktif dapat memengaruhi pola spasial beda potensial yang terukur di permukaan.

Pada medium pasir basah, distribusi beda potensial untuk model konduktor lurus ditunjukkan

pada Gambar 2b. Pola potensial memperlihatkan gradien yang relatif kontinu dari daerah dengan nilai rendah menuju daerah dengan nilai tinggi. Nilai maksimum mencapai sekitar 9,2 V. Dibandingkan dengan model pasir kering, pola kontur pada pasir basah terlihat lebih halus dan perubahan nilai potensial secara spasial lebih kontinu.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kondisi medium turut memengaruhi distribusi medan listrik yang dihasilkan oleh sumber arus. Penambahan air pada pori-pori pasir meningkatkan kemampuan medium dalam menghantarkan arus dibandingkan kondisi pasir kering. Akibatnya, arus listrik dapat menyebar melalui medium secara lebih efektif sehingga distribusi potensial yang terukur menjadi lebih kontinu. Hasil ini menunjukkan bahwa respons MALM tidak hanya ditentukan oleh geometri badan konduktif, tetapi juga oleh sifat listrik medium di sekitarnya.

Distribusi Beda Potensial pada Model Konduktor Bercabang Dua

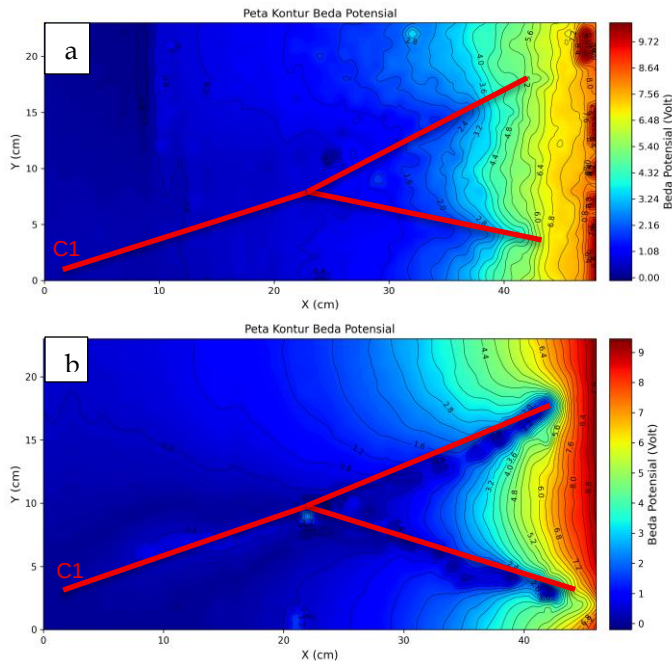
Model kedua menggunakan kawat tembaga yang dibentuk menjadi konduktor bercabang dua. Model ini digunakan untuk melihat bagaimana percabangan badan konduktif memengaruhi distribusi potensial yang dihasilkan oleh metode MALM.

Pada medium pasir kering (Gambar 3a), distribusi beda potensial menunjukkan pola yang lebih kompleks dibandingkan model konduktor lurus. Nilai beda potensial berkisar dari nilai rendah pada bagian kiri hingga nilai yang lebih tinggi pada bagian kanan model, dengan nilai maksimum sekitar 10 V. Selain gradien potensial utama tersebut, terlihat beberapa perubahan bentuk kontur pada bagian tengah hingga kanan model.

Kompleksitas kontur tersebut menunjukkan bahwa perubahan geometri badan konduktif dapat menghasilkan perubahan distribusi medan listrik. Percabangan kawat menyebabkan arus yang masuk ke badan konduktif memiliki lebih dari satu jalur penyebaran. Akibatnya, medan potensial yang terbentuk di sekitar target tidak lagi memiliki pola sederhana seperti pada model lurus. Beberapa kontur tampak mengalami pembengkokan dan pemusatan pada lokasi tertentu, yang menunjukkan adanya perubahan gradien potensial secara lokal.

Pada medium pasir basah (Gambar 3b), pola distribusi potensial model bercabang menunjukkan karakteristik yang lebih jelas dibandingkan model bercabang pada pasir kering. Nilai beda potensial maksimum mencapai sekitar 9,2 V. Selain gradien potensial utama dari kiri ke kanan, terlihat perubahan bentuk kontur yang lebih tegas pada beberapa bagian model. Pola tersebut menghasilkan distribusi potensial yang lebih kompleks dibandingkan model lurus. Perbedaan antara model lurus dan bercabang

menunjukkan bahwa geometri badan konduktif berpengaruh terhadap pola distribusi beda potensial hasil pengukuran Malm. Semakin kompleks geometri badan konduktif, semakin kompleks pula pola medan potensial yang terbentuk pada medium di sekitarnya. Dengan demikian, peta kontur beda potensial dapat digunakan sebagai salah satu bentuk visualisasi untuk mengevaluasi respons Malm terhadap variasi geometri badan konduktif.



Gambar 3. Peta kontur beda potensial pada model konduktor bercabang dua dengan medium pasir kering (a) dan medium pasir basah (b). C1 merupakan posisi elektroda sumber arus dan garis merah merupakan badan konduktor. Terlihat pola percabangan di sekitar koordinat (21; 9). Pada medium pasir basah, pola kontur percabangan terlihat lebih jelas dan lebih halus.

Pengaruh Kondisi Medium terhadap Distribusi Beda Potensial

Perbandingan keempat hasil eksperimen menunjukkan adanya perbedaan respons antara medium pasir kering dan pasir basah. Secara umum, peta pada pasir basah menunjukkan distribusi kontur yang lebih kontinu dan perubahan nilai potensial yang lebih teratur dibandingkan dengan pasir kering.

Pada pasir kering, distribusi potensial cenderung menunjukkan variasi lokal yang lebih kuat. Hal tersebut dapat disebabkan oleh rendahnya konduktivitas listrik medium akibat minimnya fluida penghantar di antara butiran pasir. Dalam kondisi tersebut, sebagian besar respons medan listrik lebih dipengaruhi oleh badan konduktif, sedangkan distribusi arus melalui medium pasir relatif terbatas. Ketika pasir dibasahi, air mengisi sebagian ruang pori di antara butiran pasir sehingga

jalur penghantaran arus listrik melalui medium menjadi lebih baik. Kondisi tersebut menyebabkan medan listrik dapat menyebar melalui medium dengan lebih kontinu. Hal ini tercermin pada pola kontur yang lebih halus pada beberapa bagian peta pasir basah.

Namun demikian, peningkatan kontinuitas pola kontur pada pasir basah tidak berarti bahwa medium basah selalu menghasilkan hasil Malm yang lebih baik dalam semua kondisi. Hasil eksperimen ini hanya menunjukkan bahwa pada konfigurasi dan kondisi eksperimen yang digunakan, pasir basah menghasilkan pola distribusi potensial yang lebih mudah diamati secara spasial. Respons tersebut tetap dipengaruhi oleh kadar air, distribusi air dalam pori, konduktivitas air, resistivitas pasir, posisi elektroda, serta kondisi kontak elektroda dengan medium.

Hal tersebut penting karena pada kondisi lapangan, medium bawah permukaan tidak memiliki tingkat homogenitas seperti pasir dalam eksperimen. Variasi litologi, porositas, kadar air, rekahan, rongga, material lempung, dan tingkat kejenuhan dapat menghasilkan distribusi konduktivitas yang jauh lebih kompleks. Oleh karena itu, pola Malm pada kondisi lapangan dapat memiliki bentuk yang berbeda dari pola yang diperoleh pada eksperimen laboratorium.

Pengaruh Geometri Konduktor terhadap Respons Malm

Perbandingan antara model lurus dan bercabang menunjukkan bahwa variasi geometri target memberikan pengaruh yang cukup jelas terhadap pola kontur beda potensial. Model lurus menghasilkan pola kontur yang relatif sederhana dengan gradien potensial yang lebih teratur. Sebaliknya, model bercabang menghasilkan perubahan kontur yang lebih kompleks dan memiliki variasi lokal yang lebih banyak.

Secara konseptual, perbedaan tersebut dapat dijelaskan oleh distribusi arus pada badan konduktif. Kawat tembaga memiliki konduktivitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan pasir sehingga menjadi jalur konduktif yang dominan dalam sistem. Pada model lurus, jalur tersebut memiliki geometri sederhana sehingga distribusi potensial yang dihasilkan relatif teratur. Pada model bercabang, arus dapat mengikuti beberapa bagian dari badan konduktif sehingga distribusi medan potensial menjadi lebih kompleks.

Hasil ini menunjukkan bahwa salah satu potensi penggunaan Malm adalah membedakan respons badan konduktif berdasarkan geometrinya. Dengan kata lain, metode ini tidak hanya memberikan informasi mengenai keberadaan suatu badan konduktif, tetapi pola spasial potensialnya juga berpotensi memberikan informasi mengenai bentuk dan kontinuitas badan tersebut. Meskipun demikian, interpretasi geometri berdasarkan kontur potensial dalam penelitian ini masih

bersifat kualitatif. Penelitian ini belum melakukan inversi atau pemodelan numerik untuk menguji hubungan kuantitatif antara bentuk konduktor dan distribusi potensial. Oleh karena itu, perubahan bentuk kontur yang diamati sebaiknya dipandang sebagai respons eksperimental terhadap perubahan geometri, bukan sebagai rekonstruksi geometri target secara kuantitatif.

Implikasi terhadap Pemodelan Sungai Bawah Tanah

Penggunaan kawat tembaga dalam penelitian ini merupakan penyederhanaan untuk merepresentasikan badan konduktif yang dapat dianalogikan dengan jalur air bawah tanah. Air yang mengisi pori, rekahan, atau saluran bawah permukaan dapat menghasilkan zona dengan konduktivitas listrik yang berbeda dibandingkan batuan atau material di sekitarnya. Kondisi tersebut merupakan salah satu dasar pemanfaatan metode geolistrik untuk karakterisasi sistem air bawah tanah.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa perubahan geometri badan konduktif dari bentuk lurus menjadi bercabang menghasilkan perubahan pola distribusi beda potensial. Secara konseptual, hal tersebut menunjukkan bahwa MALM memiliki potensi untuk memberikan informasi mengenai geometri dan kontinuitas suatu zona konduktif.

Namun, perlu dibedakan antara geometri badan konduktif dan arah aliran air. Peta beda potensial yang diperoleh dalam eksperimen ini dapat digunakan untuk menginterpretasikan keberadaan dan pola distribusi badan konduktif, tetapi belum dapat digunakan untuk menentukan arah aliran air tanah secara langsung. Penentuan arah dan kecepatan aliran memerlukan informasi tambahan, misalnya pengukuran *time-lapse*, *tracer*, data hidrologi, atau pengukuran pada kondisi aliran yang sebenarnya. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat dikaitkan dengan pemetaan atau delineasi zona konduktif yang berpotensi merepresentasikan jalur air bawah tanah.

Implikasi tersebut relevan untuk lingkungan karst seperti Gunungkidul. Sistem sungai bawah tanah di kawasan karst berkembang melalui jaringan rekahan, rongga, dan saluran pelarutan yang memiliki geometri tidak beraturan. Dibandingkan model kawat yang digunakan dalam penelitian ini, kondisi tersebut jauh lebih kompleks. Oleh karena itu, eksperimen ini dapat dipandang sebagai tahap awal untuk memahami respons dasar MALM terhadap geometri badan konduktif sebelum diterapkan pada model bawah permukaan yang lebih kompleks.

Keterbatasan Eksperimen

Eksperimen ini dilakukan pada medium pasir yang relatif homogen sehingga kondisi tersebut belum

sepenuhnya merepresentasikan kondisi bawah permukaan di lapangan. Lingkungan bawah permukaan alami memiliki variasi sifat listrik dan fisik akibat heterogenitas litologi, perubahan porositas, kadar air, rekahan, rongga, serta keberadaan material dengan konduktivitas yang berbeda.

Selain itu, penggunaan kawat tembaga memberikan kontras konduktivitas yang sangat tinggi terhadap pasir. Kondisi tersebut berbeda dengan kondisi sungai bawah tanah sebenarnya, karena air bawah tanah tidak memiliki konduktivitas setinggi logam dan interaksi antara air, batuan, rekahan, dan sedimen jauh lebih kompleks. Oleh sebab itu, hasil eksperimen tidak dapat langsung digunakan untuk memperkirakan ukuran atau posisi sungai bawah tanah sebenarnya.

Keterbatasan tersebut justru menjadi dasar untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Eksperimen berikutnya dapat dilakukan dengan menggunakan medium heterogen, variasi kadar air atau tingkat kejenuhan, material dengan resistivitas berbeda, serta model konduktif dengan geometri yang lebih kompleks. Selain itu, pemodelan kedepan (*forward modelling*) dan pemodelan kebelakang (*inverse modelling*) dapat digunakan untuk membandingkan distribusi potensial hasil eksperimen dengan distribusi potensial teoritis.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen, metode Mise à la Masse (MALM) mampu menunjukkan perbedaan respons distribusi beda potensial akibat variasi geometri badan konduktif berupa model lurus dan bercabang dua. Model bercabang menghasilkan pola distribusi potensial yang lebih kompleks dibandingkan model lurus, sedangkan medium pasir basah pada konfigurasi eksperimen ini menghasilkan pola kontur yang relatif lebih kontinu dibandingkan pasir kering.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa respons MALM dipengaruhi oleh interaksi antara geometri badan konduktif dan kondisi kelistrikan medium. Meskipun demikian, eksperimen ini masih menggunakan medium homogen dan badan konduktif yang sangat kontras terhadap medium sehingga belum merepresentasikan kompleksitas kondisi bawah permukaan alami. Oleh karena itu, penelitian ini merupakan tahap awal untuk memahami respons MALM terhadap badan konduktif sebagai model sederhana jalur air bawah tanah dan dapat dikembangkan lebih lanjut menggunakan medium heterogen serta model geometri yang lebih realistis.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi terhadap penelitian ini dari awal sampai akhir.

Referensi

- Chen, Y., Dong, W., Ren, H., & Li, X. (2023). Mise-a-la-masse method, tracer tests and cave detection analysis of underground-river karst-conduit distribution and structure: A case study of the Dafengdong conduits in Guizhou Province, China. *Hydrogeology Journal*, 31(3), 589–600. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02609-6>
- Gan, F., Han, K., Lan, F., Chen, Y., & Zhang, W. (2017). Multi-geophysical approaches to detect karst channels underground—A case study in Mengzi of Yunnan Province, China. *Journal of Applied Geophysics*, 136, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.10.036>
- Gupta, D. (2007). Mise-a-la-masse – A cost effective method in mineral exploration. *Journal of the Geological Society of India*, 69.
- Ling, C., Revil, A., Qi, Y., Abdulsamad, F., Shi, P., Nicaise, S., & Peyras, L. (2019). Application of the Mise-à-la-Masse method to detect the bottom leakage of water reservoirs. *Engineering Geology*, 261, 105272. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105272>
- Mary, B., Peruzzo, L., Boaga, J., Schmutz, M., Wu, Y., Hubbard, S. S., & Cassiani, G. (2018). Small-scale characterization of vine plant root water uptake via 3-D electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10), 5427–5444. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5427-2018>
- Mary, B., Peruzzo, L., Wu, Y., & Cassiani, G. (2022). Advanced Potential Field Analysis Applied to Mise-à-la-Masse Surveys for Leakage Detection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(11), e2022JB024747. <https://doi.org/10.1029/2022JB024747>
- Mu'in, F., Alfiansyah, D., Udin, Y., Anendito, A., Yuliantoro, P., Buditama, A., Pratiwi, M., Hartantyo, E., Marwan Irnaka, T., Suroso, T., Wibowo, N., Yuliasongko, M., & Suwardi, B. (2024). Labscale Experiment Fluid Injection Using Self Potential, Electrical Resistivity Tomography, and Mise-à-la-Masse. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202471067>
- Mustopa, E., Suhanto, E., Srigutomo, W., & Sutarno, D. (2016). Resistivity Imaging of Mataloko Geothermal Field By Mise-À-La-Masse Method. *Indonesian Journal of Physics*, 22. <https://doi.org/10.5614/itb.ijs.2011.22.2.3>
- Pant, S. R. (2004). Tracing Groundwater Flow by Mise-à-la-masse Measurement of Injected Saltwater. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 9(3), 155–165. <https://doi.org/10.4133/JEEG9.3.155>
- PARASNIS, D. (2006). Three-dimensional electric mise-à-la-masse survey of an irregular lead-zinc-copper deposit in central Sweden. *Geophysical Prospecting*, 15, 407–437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1967.tb01796.x>
- Perri, M. T., De Vita, P., Masciale, R., Portoghese, I., Chirico, G. B., & Cassiani, G. (2018). Time-lapse Mise-à-la-Masse measurements and modeling for tracer test monitoring in a shallow aquifer. *Journal of Hydrology*, 561, 461–477. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.013>
- Perrin, R., Dickson, K., & Dawson, J. (2019). Delineation of a conductive aquifer using mise-a-la-masse with a modified acquisition geometry. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2019* (pp. 108–111). Society of Exploration Geophysicists and Environment and Engineering Geophysical Society. <https://doi.org/10.4133/sageep.32-027>
- Singh, L. N., & Banglani, S. (2009). Mise-a-la-masse survey-An useful tool in tracing polymetallic sulphide mineralisation in Biranthiya Khurd area, Pali district, Rajasthan. *Indian Minerals*, 63, 389–396.