

Kajian Numerik Kesalahan Hasil Pengukuran Geolistrik 2D Terhadap Target Model 3D: Studi Kasus Pengukuran di Dekat Gedung Berpondasi Beton

Numerical Error Analysis on 2D Geoelectric Measurement Due to 3D Target Model: Case Study Line Measurement Nearby a Building Foundation

Eddy Hartantyo

Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara Yogyakarta, 55281, Indonesia

Email : hartantyo@ugm.ac.id

(Received 19 November 2022; Revised 13 March 2023; Accepted 30 May 2023; Published 30 November 2023)

Abstrak

Survei geolistrik 2D dikaji berdasarkan asumsi bahwa model geolistrik bawah permukaan yang dihadapi adalah model 2D, dimana tidak terdapat variasi nilai resistivitas pada horisontal arah tegak lurus lintasan. Namun, pada beberapa kondisi, asumsi ini memberikan kesalahan ketika model yang dihadapi ternyata adalah model 3D. Pada paper ini dituliskan kajian komputasi terhadap pengaruh keberadaan pondasi bangunan terhadap lintasan-lintasan geolistrik di sampingnya. Model berukuran $120 \times 44 \times 15$ node dengan spasi horisontal 0,5 m, tersusun oleh 4 lapisan akuifer normal yang mendatar. Digunakan 21 node tambahan untuk syarat batas Neumann di sisi-sisi model selain permukaan. Pada 5 node di sisi utara diberikan model blok pondasi sebuah bangunan. Perhitungan dilakukan menggunakan penyelesaian beda hingga Res3Dmod pada 21 lintasan untuk 4 konfigurasi: *Schlumberger*, *Wenner*, *Dipole-dipole* dan *Pole-pole*. Hasil kajian menunjukkan bahwa; pada kajian nilai selisih resistivitas semu pada area pondasi, konfigurasi *Dipole-dipole* memberikan respon yang paling tinggi terhadap kesalahan tersebut hingga pada jarak 11 m untuk selisih resistivitas semu $< 3 \Omega m$, sedangkan ketiga konfigurasi yang lain berada pada jarak 8 m. Nilai eror secara keseluruhan kurang dari 1%: *Wenner* dan *Pole-pole* sejauh 10 m dari pondasi, *Schlumberger* sejauh 11 m dari pondasi, dan *Dipole-dipole* sejauh 13 m dari pondasi. Konfigurasi *Wenner* memberikan respon yang paling baik dan konfigurasi *Wenner* juga merupakan konfigurasi yang direkomendasikan untuk menghindari kesalahan pengukuran 2D akibat keberadaan model 3D di bawahnya.

Kata kunci: eror, geolistrik 2D, pondasi bangunan

Abstract

*The 2D geoelectric survey was always assumed that subsurface model is also 2D, whereas no resistivity anomalies in the horizontal direction perpendicular to the line direction. Nevertheless, on some conditions, this assumption will raise error if there was 3D model in subsurface. This paper we will show the effect of building foundations to geoelectric lines which measured nearby in some distances. Model consists of $120 \times 44 \times 15$ nodes, with 0.5 m horizontally spaced, consists of 4 layers horizontally normal aquifers. We use 21 extra nodes for Neumann's boundary conditions on every sides except surface. On the fifth node (north part) we add subsurface foundation. Calculation was performed by finite difference Res3Dmod software, for 21 lines and 4 configurations: *Schlumberger*, *Wenner*, *Dipole-dipole* and *Pole-pole*. Result shows that: on the apparent resistivity differences $< 3 \Omega m$ near foundation, the dipole-dipole giving highest error up to 11 m distances, otherwise the other three configuration was reached at 8 meter distances. For error classification less than 1%, we get *Wenner* and *Pole-pole* were 10 m distance from foundation, *Schlumberger* was 11 m and *Dipole-dipole* was 13 m. *Wenner* configuration was the best response for this case, and it also recommended configuration to minimize the 2D measurement error due to 3D model beneath the line.*

Keywords: 2D geoelectric, building foundations, error



1. Latar Belakang

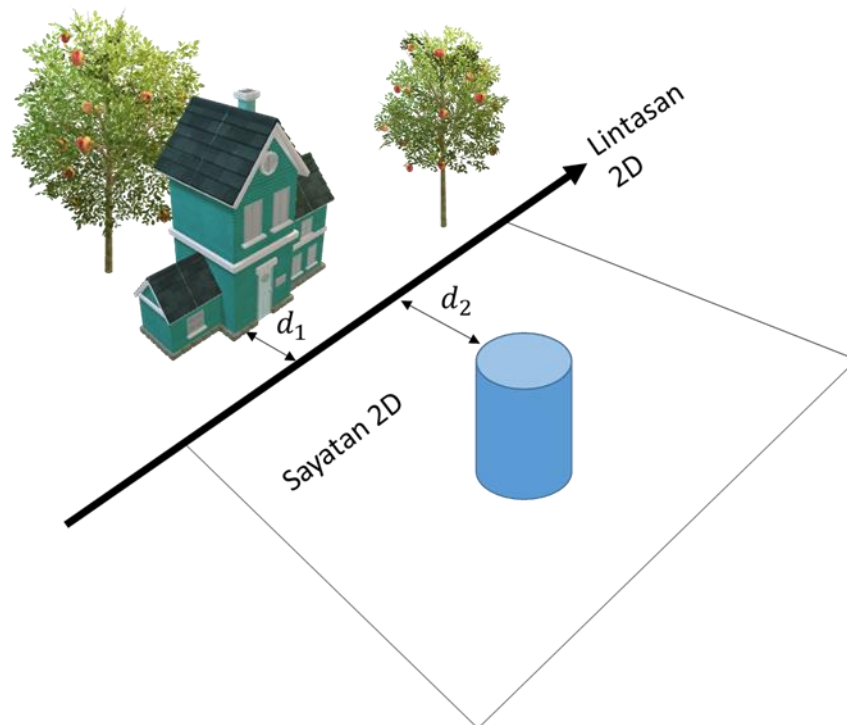
Metode geolistrik merupakan salah satu metode aktif dari keilmuan geofisika. Metode ini dilakukan dengan menginjeksikan arus searah (atau bolak-balik frekuensi rendah) lewat dua buah elektroda logam (C1, C2) pada dua titik permukaan tanah. Pada saat arus mengalir, diukur beda potensial dari dua elektroda potensial (P1, P2) yang ditancapkan pada dua titik yang lain. Berdasarkan posisi masing-masing elektroda, besarnya arus yang dialirkan, dan beda potensial yang terukur, dapat ditentukan nilai resistivitas semu. Posisi kedalaman semu (*pseudo-depth*) resistivitas semu tersebut menyesuaikan dengan konfigurasi (tatacara) elektroda yang digunakan.

Pengukuran geolistrik dalam bentuk lintasan dua dimensi (2D) telah dilakukan oleh banyak penulis [1, 2, 3, 4]. Mereka menggunakan kajian 2D geolistrik dalam permasalahan hidrogeologi dengan tidak memperhitungkan kajian benda-benda 3D disekitarnya. Dalam bidang geoteknik [5] terutama dalam penggambaran lapisan tanah di bawah permukaan, kajian geolistrik 2D untuk kasus-kasus geoteknik dilakukan tanpa

mempertimbangkan keberadaan benda 3D disekitarnya. Hasil proses inversi yang diperoleh berupa kontur sayatan nilai resistivitas tanah/batuan di bawah lintasan pengukurannya.

Hasil sayatan 2D yang dihasilkan pada survei tomografi resistivitas (ERT) 2D dikaji berdasarkan asumsi bahwa model geolistrik bawah permukaan yang dihadapi adalah model 2D, dimana tidak terdapat variasi nilai resistivitas pada arah tegak lurus lintasan. Namun, pada beberapa kondisi, asumsi ini memberikan kesalahan ketika model yang dihadapi ternyata adalah model 3D [6]. Efek model resistivitas yang berasal dari sisi luar lintasan, baik sisi kiri maupun kanan, akan berpengaruh terhadap pengukuran 2D tersebut.

Gambar 1 menunjukkan sketsa kasus yang sering dihadapi saat pengukuran di lapangan, terutama di daerah urban yang banyak terdapat bangunan/pondasi bangunan di bawah permukaan. Dari pengukuran geolistrik pada lintasan 2D di sisi sebuah bangunan akan tetap menangkap pengaruh pondasi bangunan tersebut dalam datanya. Padahal, hasil pemodelan akan digambarkan pada sayatan sepanjang lintasan 2D tersebut. Hal ini dapat berakibat kesalahan model



Gambar 1. Model situasional pengukuran lintasan geolistrik 2D yang dipengaruhi oleh anomali 3D yang berada di samping lintasan sejauh d_1 atau d_2 . Pengaruh ini akan terdeteksi oleh 2D dan digambarkan sebagai model anomali di bawah lintasan 2D.



yang dihasilkan. Pondasi bangunan maya akan terbentuk di bawah lintasan 2D dimana sebenarnya pondasi berada di sampingnya. Jika derau akibat model 3D di samping lintasan tersebut diketahui, maka perlu di kaji berapa jarak optimum untuk menghilangkan efek benda 3D tersebut. Namun, jika benda anomali 3D tidak diketahui, maka akan terjadi kesalahan model di bawah lintasan 2D. Kondisi ini dikenal sebagai *side-effect* dari model 3D yang diukur dengan lintasan 2D.

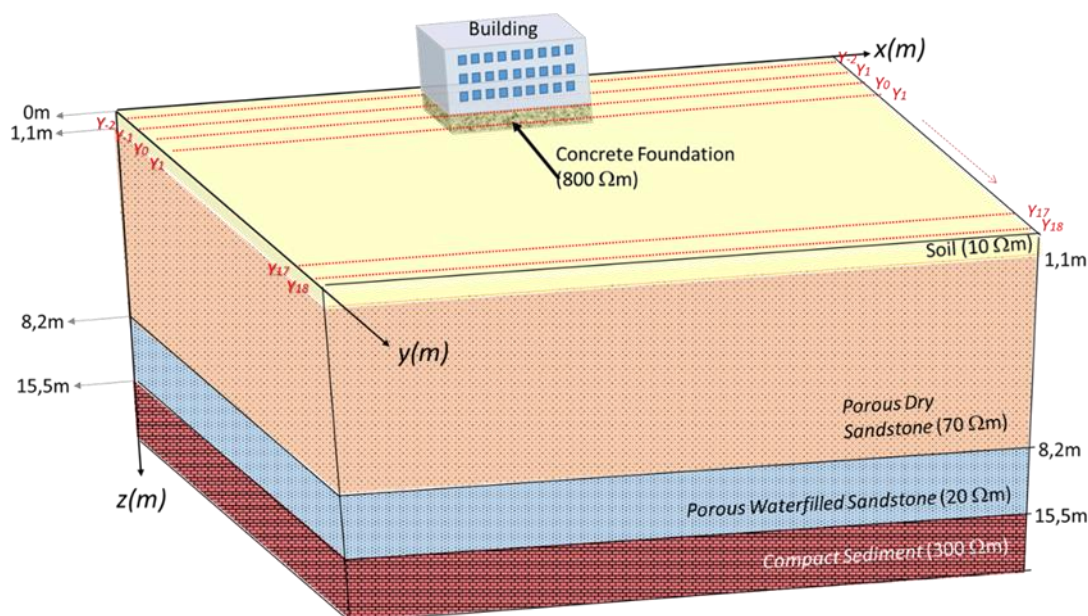
Pengukuran geolistrik 2D pernah dilakukan di samping sebuah gedung yang memiliki ruang basemen di bawahnya [7] menggunakan konfigurasi *Wenner*. Pengaruh basemen kosong di bawahnya sangat kelihatan dalam data pengukurannya. Untuk verifikasinya, dilakukan pemodelan fisis ukuran mini pada sebuah akuarium. Respon pengukuran yang dihasilkan identik dan diyakini bahwa respon basement itu akan mempengaruhi dengan sangat kuat. Namun, di dalam tulisan tersebut, belum dilakukan kajian terkait jarak optimum agar respon derau basemen relatif kecil terhadap geolistrik 2D yang dilakukan. Hamedra [8] juga melakukan pengukuran geolistrik 2D untuk target bangunan, tanpa mempertimbangkan keberadaan bangunan di samping lintasannya.

Dalam paper ini, kajian pengaruh model 3D yang berada di sini kanan kiri lintasan dihitung menggunakan pemodelan 3D berdasarkan model beda hingga [9] dengan batas bidang tak hingga menggunakan pendekatan blok-blok tambahan. Kemudian dengan melakukan perhitungan data sintesis pada lintasan dengan variasi jarak terhadap pondasi, maka akan diperoleh respon pondasi sebagai fungsi jarak. Perhitungan menggunakan *software open Res2Dmod*. Konfigurasi yang digunakan adalah *Schlumberger, Wenner, Dipole-dipole*, dan *Pole-pole*. Pada lintasan-lintasan 2D yang diletakkan pada model 3D, didapatkan data resistivitas semu pada setiap lintasan yang dihitung. Kajian ini akan memberikan '*insight*' berapa nilai kesalahan yang akan diperoleh jika pengukuran 2D tetap dipaksakan untuk model 3D.

2. Metodologi

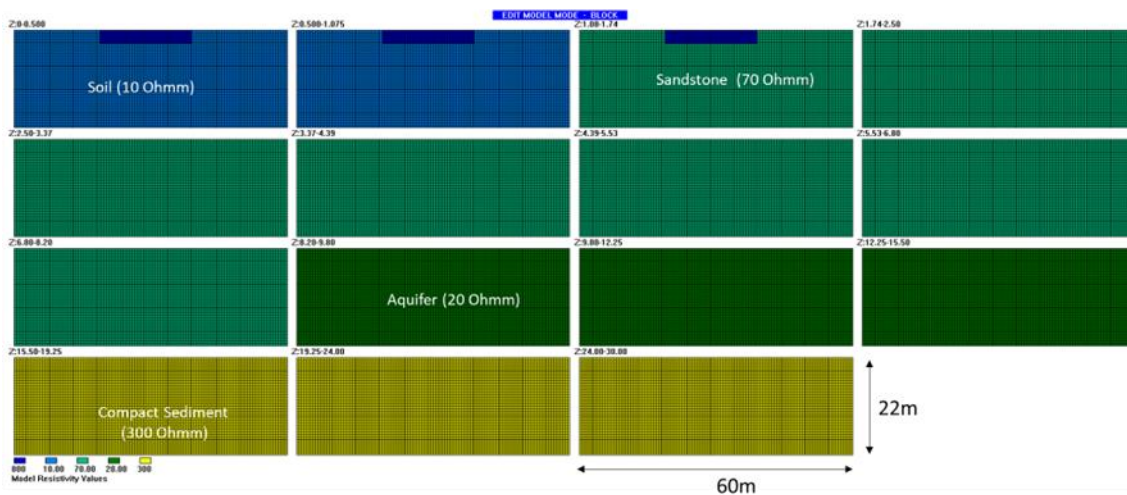
Model sintetik 3D resistivitas disusun berdasar model blok dan penyelesaian beda hingga dari [9] yang telah dibuat dalam perangkat lunak *Res3Dmod* [10].

Model terdiri dari model normal geolistrik untuk kajian hidrogeologi air tanah yang terdiri dari 4 lapisan (Gambar 2). Lapisan model berturut-turut dari permukaan adalah soil/tanah ($\rho_1 = 10 \Omega m$, $d_1 = 1,1 m$); batupasir berpori relatif



Gambar 1. Sketsa model 3D yang dibangun, terdiri dari 4 lapisan sebagai model lapisan mendatar air tanah. Sumbu x menyatakan arah Barat-Timur, sumbu y arah Utara-Selatan dan sumbu z arah kedalaman. Terdapat target derau berupa bangunan dengan pondasi di sebelah utara. Lintasan dibuat sejumlah 21 buah (2 lintasan di atas pondasi (Y_{-2}, Y_{-1}), 1 lintasan tepat di batas (Y_0), dan berjarak dari batas ($Y_1 \dots Y_{18}$)).





Gambar 3. Diskritisasi model yang digunakan untuk model A dengan pondasi. Warna menunjukkan nilai resistivitas model. Sebagai pembandingan untuk model tanpa pondasi, blok pondasi (warna biru hitam – 800 Ωm) dihilangkan dengan diganti menjadi blok soil (10 Ωm).

kering ($\rho_2 = 70 \Omega m, d_2 = 7,1m$); batupasir berpori berisi air ($\rho_3 = 20 \Omega m, d_3 = 7,3m$); dan sedimen kompak ($\rho_4 = 300 \Omega m, d_4 = \sim m$).

Pada sisi sebelah utara terdapat bagian bangunan gedung yang memiliki pondasi dengan ($\rho_1 = 800 \Omega m, d_p = 1,74 m$) dari permukaan. Sebanyak 21 lintasan sintetik geolistrik 2D (garis titik-titik merah pada Gambar 2) dilakukan pada arah Barat-Timur dengan rincian: Dua buah lintasan melewati atas pondasi langsung dengan kode (Y_{-2}, Y_{-1}) artinya -2 dan -1 meter dari batas; satu lintasan Y_0 tepat melewati batas selatan pondasi, dan 18 lintasan ($Y_{+1} \dots Y_{+18}$) yang berarti terletak pada jarak 1 m hingga 18 m dari batas. Dari setiap lintasan tersebut dilakukan perhitungan resistivitas semu sintetik untuk empat konfigurasi populer dalam geolistrik 2D, yaitu *Schlumberger*, *Wenner*, *Dipole-dipole* dan *Pole-pole*.

Sejumlah $120 \times 44 \times 15$ node digunakan sebagai diskritisasi model pada gambar 2 yang dilakukan dengan Res3Dmod (Gambar 3). Nilai resistivitas model dibentuk dalam blok-blok yang berukuran luas permukaan $0,5 m \times 0,5 m$ dengan ketebalan bervariasi sesuai kedalaman terkoreksi berurutan dari lapisan terdangkal menuju terdalam yaitu; $0,5 m - 0,575 m - 0,66 m - 0,76 m - 0,87 m - 1,02 m - 1,14 m - 1,27 m - 1,4 m - 1,6 m - 2,45 m - 3,25 m - 3,75 m - 4,75 m - 6 m$. Untuk perhitungan batas tak hingga yang berada pada sisi di bawah permukaan, digunakan ekstra node sebanyak 21 titik di setiap sisi blok sesuai syarat batas Neumann

[10], sedangkan pada sisi atas, digunakan syarat batas permukaan udara bebas [9].

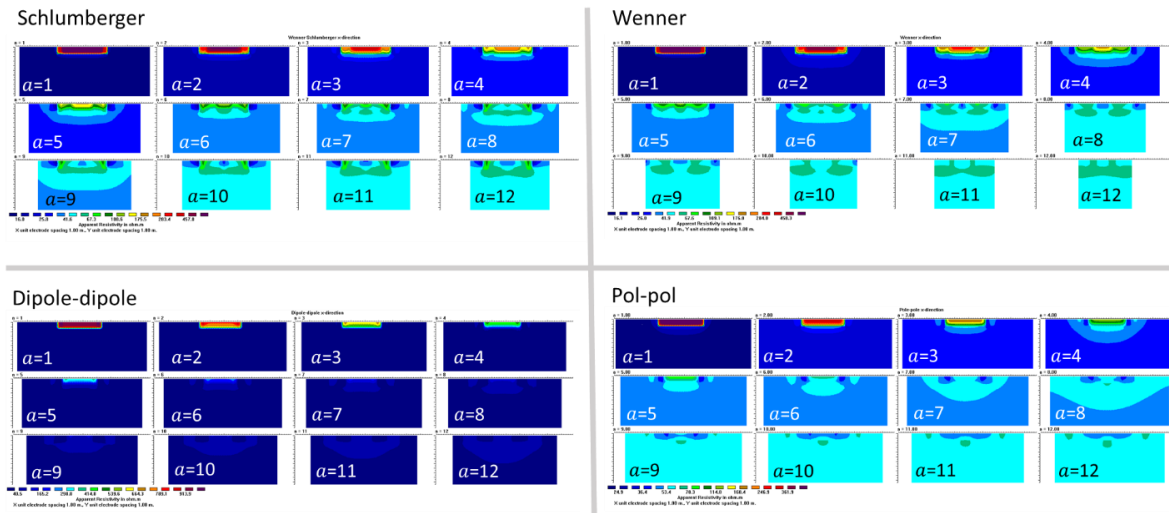
Model yang dibuat adalah dua buah, yaitu model A dengan pondasi (Gambar 3) dan model B tanpa pondasi, yang dibuat dengan mengganti blok pondasi ($800 \Omega m$) menjadi blok soil ($100 \Omega m$). Blok-blok yang lain, untuk model tanpa pondasi bernilai tetap. Kedua model tersebut dihitung nilai resistivitas semunya, untuk kemudian dikurangkan sehingga diperoleh selisih eror akibat pondasi.

3. Hasil dan Pembahasan

Perhitungan nilai resistivitas semu menggunakan Res3Dmod baik untuk model A maupun B dilakukan untuk konfigurasi *Schlumberger*, *Wenner*, *Dipole-dipole* dan *Pole-pole*. Hasil untuk model A ditunjukkan pada Gambar 4. Pada setiap konfigurasi ditunjukkan nilai resistivitas semu pada *pseudo-depth* (a) dari 1 hingga 12. Perhitungan dilakukan di sepanjang lintasan Y_{-2} hingga Y_{18} sehingga dapat diketahui jarak optimum untuk mendapatkan pengaruh minimal dari pondasi.

Pada Gambar 4, warna merah kehitaman menunjukkan nilai resistivitas semu tinggi dan biru kehitaman resistivitas rendah. Nilai tinggi maksimum yang terhitung adalah $800 \Omega m$, sesuai dengan nilai resistivitas model tertinggi, dan resistivitas semu terendah adalah $10 \Omega m$. Efek derau akibat keberadaan pondasi terlihat jelas berbentuk kotak persegi di bagian atas sayatan horisontal tersebut (bagian Utara) hingga kedalaman $a = 4$. Mulai kedalaman $a = 5$, bentuk





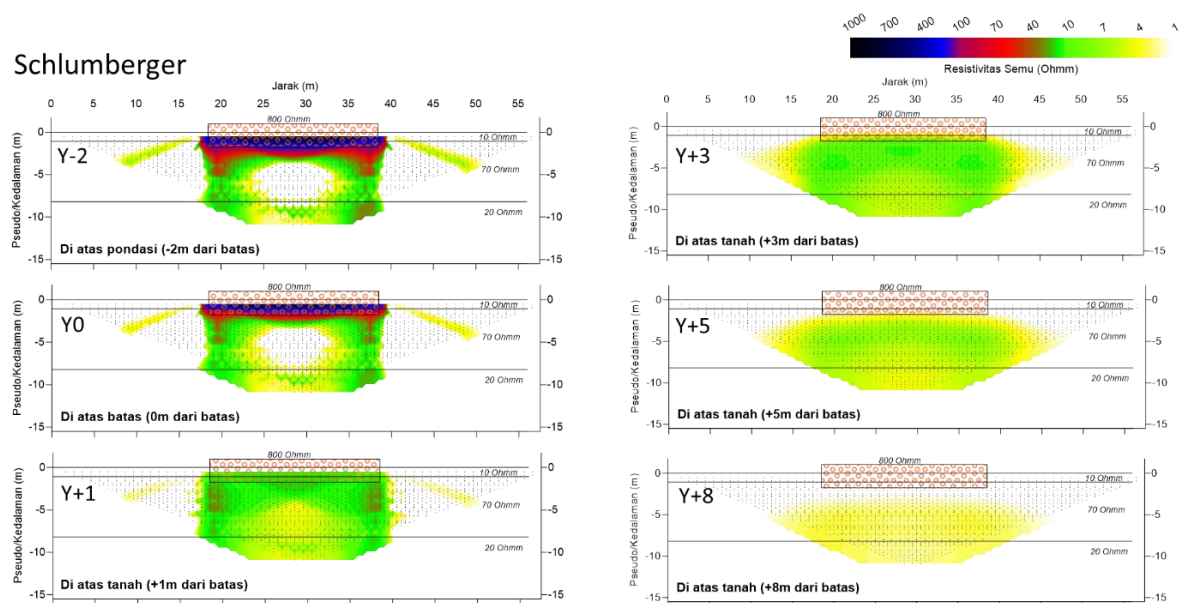
Gambar 4. Hasil perhitungan resistivitas semu sesuai dengan konfigurasi (*Schlumberger*, *Wenner*, *Dipole-dipole* dan *Pole-pole*). Hasil ditunjukkan dalam sayatan horisontal pada tiap-tiap kedalaman $a = 1 - 12$ untuk setiap konfigurasi. Efek keberadaan pondasi terlihat berbentuk kotak pada bagian atas (Utara) dari setiap sayatan.

kotak anomali dari pondasi berubah menyesuaikan sensitivitas konfigurasi yang digunakan [10].

Untuk konfigurasi dengan elektroda potensial di tengah-tengah elektroda arus (*Schlumberger* dan *Wenner*), pola sensitivitas diperoleh hampir sama dengan osilasi warna yang terjadi antara biru ke biru muda dan hijau. Bentuk osilasi ini menerus hingga pada kedalaman pseudo $a = 12$. Namun, kelihatan bahwa kontras warna pada level *pseudo-depth* terdalam yang disayat (yaitu $a = 12$), konfigurasi *Wenner* relatif sudah tidak merasakan

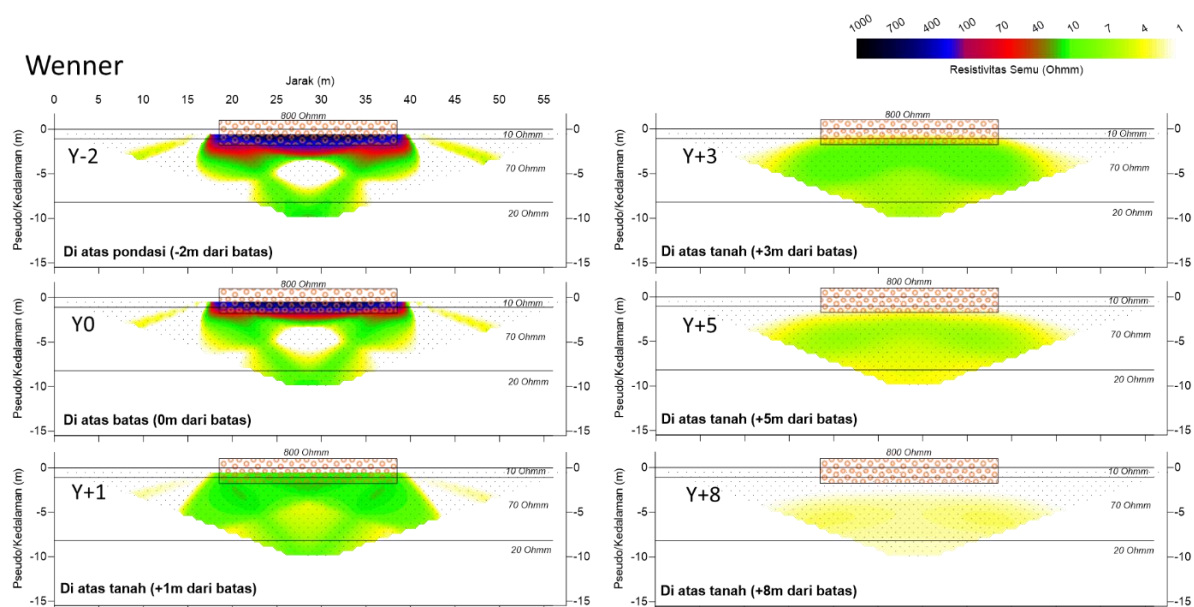
kehadiran pondasi dibandingkan dengan konfigurasi *Schlumberger*.

Dari Gambar 4, pada konfigurasi *Dipole-dipole*, pola kotak anomali akibat keberadaan pondasi lebih terlihat jelas hingga $a = 5$, kemudian diikuti oleh pola osilasi yang lebih sederhana dibandingkan dua konfigurasi di atasnya. Pola warna setelah *pseudo-depth* $a = 6$ terlihat lebih bersih, menandakan bahwa respon dipole-dipole terhadap anomali di permukaan relatif lebih baik dan sesuai dengan sensitivitasnya [10].



Gambar 5. Selisih resistivitas semu model A dan B yang digambarkan dalam sayatan vertikal sebagai fungsi jarak dari pondasi untuk konfigurasi *Schlumberger*. Kotak dengan isi lingkaran-lingkaran berwarna merah adalah posisi pondasi.





Gambar 6. Selisih resistivitas semu model A dan B yang digambarkan dalam sayatan vertikal sebagai fungsi jarak dari pondasi untuk konfigurasi *Wenner*. Kotak dengan isi lingkaran-lingkaran berwarna merah adalah posisi pondasi.

Untuk konfigurasi *Pole-pole*, efek pondasi nampak terlihat cukup baik hingga $a = 4$, kemudian diikuti pola sensitivitasnya yang terlihat masih berpengaruh hingga kedalaman $a = 12$. Dibandingkan dengan konfigurasi *Dipole-dipole*, respon anomali berbentuk kotak nampak lebih *smooth* dan jelas pada konfigurasi *Dipole-dipole*.

Respon pondasi dapat dilihat secara lebih konsisten jika data volume resistivitas semu *pseudo-depth* pada Gambar 4 hasil model A, dikurangi dengan model B. Gambar 5-8 menunjukkan sayatan vertikal data resistivitas semu hasil pengurangan model A terhadap model B. Sayatan-sayatan ini ditampilkan hanya sebagian lintasan dan jarak maksimumnya dibatasi hingga beda resistivitas semu mencapai warna kuning, atau nilai selisihnya kurang dari $4 \Omega m$.

Pada konfigurasi *Schlumberger* (lihat Gambar 5), efek pondasi terlihat secara jelas jika pengukuran dilakukan di atasnya, hingga tepat pada batas pondasi (pada lintasan Y_0). Nilai selisih resistivitas semu yang didapatkan juga cukup tinggi, berada pada orde $350 \Omega m$, terutama pada *pseudo-depth* dangkal. Pada lintasan berjarak 1 m dari pondasi (Y_{+1}) pola akibat pondasi mulai memudar cukup banyak dan menurun secara signifikan hingga selisihnya berada pada orde $20 \Omega m$.

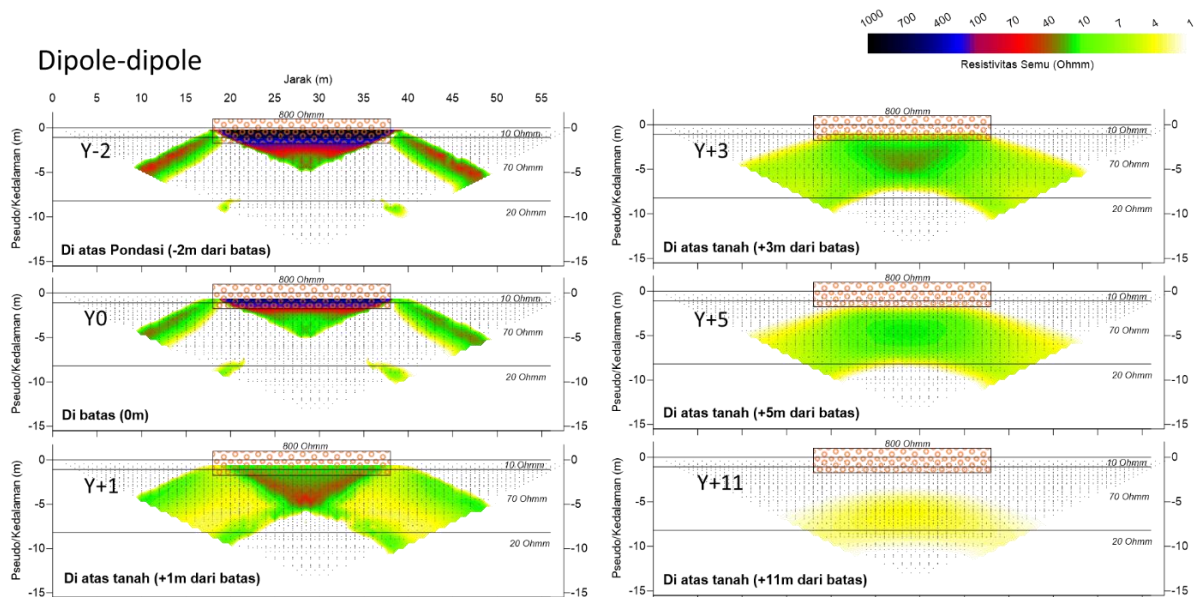
Mulai pada jarak 3 m dari pondasi didapatkan selisih yang kurang dari $10 \Omega m$. Jika dibandingkan

dengan resistivitas pondasi sebesar $800 \Omega m$, nilai selisih ini relatif kecil. Namun jika dibandingkan dengan resistivitas tanah, yaitu $10 \Omega m$, maka kesalahan yang terjadi sangat besar yakni bernilai mendekati 100%. Pada jarak 8 m dari pondasi, selisih nilai akibat pondasi kurang dari $2 \Omega m$, yang cukup kecil, terutama terhadap resistivitas di lokasi *pseudo-depth* tersebut yaitu pada lapisan pasir kering senilai $70 \Omega m$.

Pada konfigurasi *Wenner* (lihat Gambar 6), terlihat bahwa lintasan di atas pondasi (Y_{-2}), tentu saja didapatkan selisih yang sangat besar. Selisih ini masuk akal, karena memang di bawah lintasan terdapat pondasi tersebut. Pengaruh pondasi mulai mengecil pada lintasan tepat di tepi pondasi (Y_0). Selisih dengan orde kurang dari $10 \Omega m$ (berwarna hijau) membentuk pola sensitivitas untuk konfigurasi *Wenner*, yaitu selisih yang sangat kecil (kurang dari $1 \Omega m$) tepat di bawah *pseudo-depth* pondasi.

Pada jarak 1 m dari pondasi, efek pondasi ini sangat berkurang, terlihat dari nilai selisih yang sebelumnya (pada Y_0) bernilai $75-300 \Omega m$, menjadi kurang dari $15 \Omega m$. Tetapi *pseudo-depth* selisih ini masih berada pada kedalaman lapisan *soil* yang bernilai $10 \Omega m$. Sehingga nilai selisih ini masih cukup besar dibandingkan dengan resistivitas *soil*





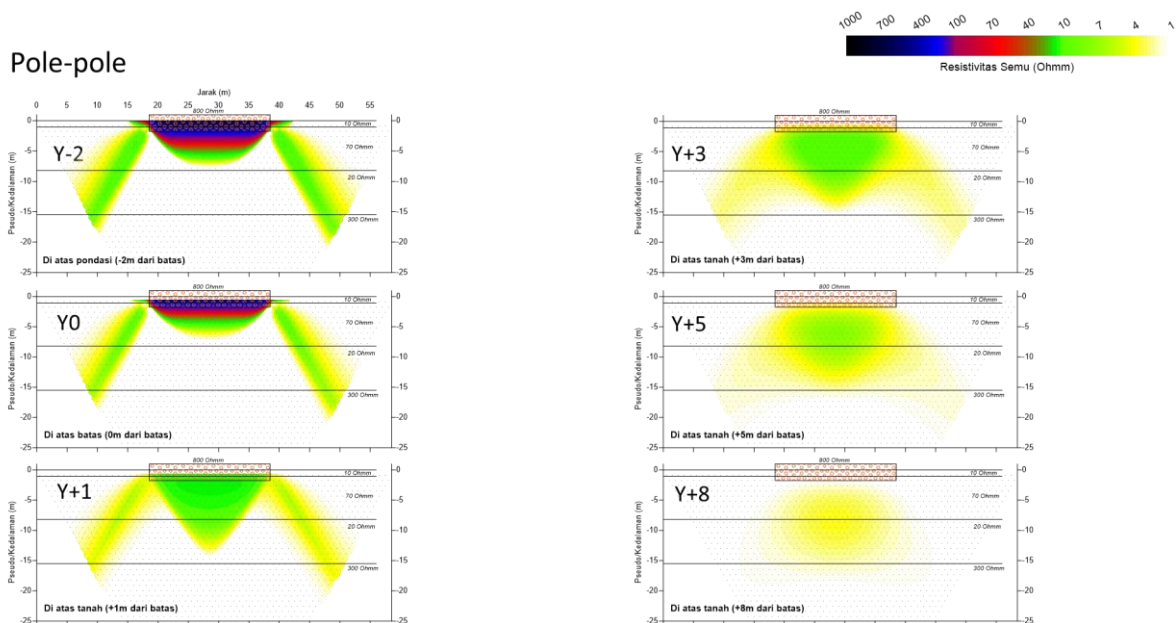
Gambar 7. Selisih resistivitas semu model A dan B yang digambarkan dalam sayatan vertikal sebagai fungsi jarak dari pondasi untuk konfigurasi *Dipole-dipole*. Kotak dengan isi lingkaran-lingkaran berwarna merah adalah posisi pondasi.

tersebut. Selisih resistivitas semu yang bernilai kurang dari $3 \Omega m$ bisa didapatkan pada jarak 8 m dari pondasi. Posisi *pseudo-depth* selisih ini berada pada lapisan pasir kering dengan resistivitas $70 \Omega m$. Nilai selisih ini memberikan kesalahan kurang dari 5% terhadap target resistivitas.

Konfigurasi yang menjadi favorit dalam akuisisi data resistivitas adalah konfigurasi *Dipole-dipole*. Pada konfigurasi ini (lihat Gambar 7), nampak bahwa pada jarak 1 m dari pondasi,

terdapat pola selisih dalam orde $70-100 \Omega m$ membentuk pola khas sensitivitas *Dipole-dipole* seperti huruf "V".

Hal ini memberikan *insight* bahwa efek pondasi pada jarak 1 m di permukaan akan memberikan kesalahan hasil hingga *pseudo-depth* 5 m. Berdasarkan kajian jarak terhadap posisi pondasi, selisih yang kurang dari $3 \Omega m$ diperoleh pada jarak 11 m (Y_{+11}) dari pondasi (Gambar 7 kanan bawah). Dari analisis segmen ini, respon terhadap



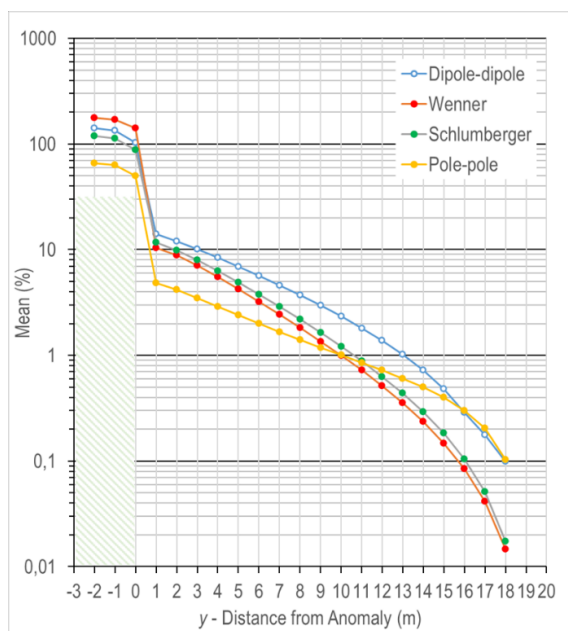
Gambar 8. Selisih resistivitas semu model A dan B yang digambarkan dalam sayatan vertikal sebagai fungsi jarak dari pondasi untuk konfigurasi *Pole-pole*. Kotak dengan isi lingkaran-lingkaran berwarna



keberadaan benda di samping lintasan untuk *Dipole-dipole* paling tinggi dibandingkan dengan *Wenner* dan *Schlumberger*.

Walaupun konfigurasi *Pole-pole* ini sedikit sekali dipergunakan untuk kajian survei 2D, namun respon kesalahan data akibat keberadaan pondasi (Gambar 8) lebih baik dibandingkan dengan *Dipole-dipole*, namun lebih buruk dibandingkan dengan *Wenner* dan *Schlumberger*. Pada lintasan berjarak 8 m dari pondasi (Y_{+8}) masih terdapat selisih yang bernilai sekitar $4 \Omega m$. Nilai ini masih lebih tinggi dibandingkan pada lintasan yang berjarak sama untuk konfigurasi *Wenner* dan *Schlumberger*. Jangkauan kedalaman pseudo dari konfigurasi *Pole-pole* ini paling dalam, yakni bisa mencapai kedalaman hingga $a = 25$ m.

Kajian di atas hanya menunjukkan kajian terhadap bentuk/pola pada titik-titik yang spesifik berada pada lokasi di bawah pondasi, walaupun sudah dapat memberikan kesimpulan terkait lokasi keberadaan selisih nilai resistivitas yang tinggi. Kajian kesalahan juga dilakukan untuk seluruh titik data yang dihitung, yaitu dengan menghitung rerata eror (*error mean*) terhadap seluruh titik data plot pada *pseudo-depth* masing-masing konfigurasi (Gambar 9).



Gambar 9. Mean error selisih nilai resistivitas semu pada berbagai konfigurasi pada setiap lintasan yang diukur. Arsir warna hijau di sebelah kiri nilai Y_0 merupakan posisi pondasi.

Pada plot data *mean error* selisih resistivitas untuk setiap lintasan, terlihat bahwa pada lintasan

di atas pondasi, respon tertinggi di berturut-turut adalah *Wenner*, *Dipole-dipole*, *Schlumberger* dan *Pole-pole*. *Wenner* memberikan respon yang paling sensitif terhadap keberadaan pondasi di bawahnya. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran lintasan 2D yang berada di atas model 3D akan memberikan respon paling besar untuk konfigurasi *Wenner* dan respon paling kecil untuk konfigurasi *Pole-pole*.

Pada lintasan-lintasan yang tidak berada di atas pondasi, terlihat bahwa *Dipole-dipole* paling sensitif terhadap keberadaan pondasi. Sensitivitas ini masih dominan dibandingkan dengan konfigurasi lainnya bahkan hingga jarak 16 m dari pondasi. Untuk konfigurasi *Pole-pole*, pada jarak yang dekat dengan pondasi hingga 8 m dari pondasi ($Y_0 - Y_{+8}$) memperlihatkan bahwa konfigurasi ini kurang sensitif terhadap keberadaan pondasi. Kekurang sensitifitasan ini sangat bagus mengindikasikan bahwa kesalahan keberadaan pondasi yang berada tidak di bawah lintasan menjadi paling kecil (bernilai 5% pada lintasan berjarak 1 m dari pondasi (Y_{+1})).

Tren *mean error* dari konfigurasi *Schlumberger* dan *Wenner* relatif sama, namun *Wenner* lebih sensitif ketika target berada di bawah lintasannya. Ketika target berada di luar lintasan 2D nya, maka *Schlumberger* yang lebih sensitif, artinya memberika eror yang lebih besar dibandingkan *Wenner*. Jika diasumsikan bahwa efek kesalahan keberadaan pondasi dihitung berdasarkan jarak lintasan terhadapnya, maka untuk desain survei yang menghasilkan data dengan *mean error* selisih maksimal 1% yaitu *Wenner* dan *Pole-pole* sejauh 10 m dari pondasi, *Schlumberger* sejauh 11 m dari pondasi, dan *Dipole-dipole* sejauh 13 m dari pondasi.

4. Kesimpulan

Dari pemodelan yang telah dilakukan, kajian nilai selisih yang fokus pada area keterdapatn pondasi dan *pseudo-depth* di bawahnya, konfigurasi *Dipole-dipole* memberikan respon yang paling tinggi terhadap kesalahan tersebut hingga pada jarak 11 m untuk selisih resistivitas semu $< 3 \Omega m$. Ketiga konfigurasi yang lain berada pada jarak 8 m. Jika diasumsikan bahwa efek kesalahan keberadaan pondasi dihitung berdasarkan jarak lintasan terhadapnya, maka untuk desain survei yang menghasilkan data dengan *mean error* selisih maksimal 1% yaitu *Wenner* dan *Pole-pole* sejauh 10 m dari pondasi, *Schlumberger* sejauh 11 m dari



pondasi, dan *Dipole-dipole* sejauh 13 m dari pondasi. Konfigurasi *Wenner* memberikan respon yang paling baik untuk lintasan 2D terhadap benda 2D atau 3D yang ada di bawahnya, dan *Wenner* juga relatif paling baik untuk menghindari kesalahan pada lintasan 2D akibat model 3D yang 'tidak' berada di bawah lintasannya..

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini merupakan bagian dari Hibah Departemen Fisika, FMIPA, UGM tahun 2021. Terimakasih penulis ucapkan kepada Dr. Wiwit Suryanto dan Dr. rer.nat Ade Anggraeni atas review dan diskusi terhadap hasil-hasilnya, serta *anonymous reviewer* untuk koreksi tulisan ini.

Daftar Pustaka

- [1] Benabdellouahab, S., Salhi, A., Himi, M., El Messari, J.E.S., Ponsati, A.C., Mesmoudi, H. and Benabdelfadel, A. Using Resistivity Methods to Characterize the Geometry and Assess Groundwater Vulnerability of a Moroccan Coastal Aquifer. *Groundwater for Sustainable Development*, **7**, pp. 293-304. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.07.004>
- [2] Essien, E.E. and Ehirim, C. N., 3D Geoelectrical Resistivity Imaging For Enhanced Shallow Subsurface Characterization, *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG)*, **7(6)**, Ser. III (Nov. – Dec. 2019), pp. 57-63. 2019.
- [3] Rusydy, I., Ikhlas, Setiawan, B., Zainal, M., Idris, S., Basyar, K., and Putra, Y.A., Integration of Borehole and Vertical Electrical Sounding Data to Characterise the Sedimentation Process and Groundwater in Krueng Aceh Basin, Indonesia, *Groundwater for Sustainable Development*, **10**, 2020.
- [4] Youssef, M.A.S., Geoelectrical Analysis for Evaluating the Aquifer Hydraulic Characteristics in AinEl-Soukhna Area, West Gulf of Suez, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, **9(1)**, pp85-98, 2020.
- [5] Ryazantsev, P.A. and Bakhmet, O.N., Application of Geoelectric Methods for Mapping Soil Heterogeneity, *Eurasian Soil Sc*, **53**, pp. 558-568, 2020.
- [6] Aizebeokhai, A.P., 2D and 3D Geo-electrical Resistivity Imaging: Theory and Field Design, *Scientific Research and Essays*, **5(23)**, pp. 3592-3605, 2010.
- [7] Bania, G. and Cwiklik, M., 2D Electrical Resistivity Tomography Interpretation Ambiguity – Example of Field Studies Supported with Analogue and Numerical Modelling. *Geology, Geophysics & Environment*, **39(4)** pp331-339, 2013.
- [8] Hamed, S., Electrical Resistance Tomography (ERT) Subsurface Imaging for Non-destructive Testing and Survey in Historical Buildings Preservation. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, **7(1)**: pp. 344-357, 2013.
- [9] Dey and Morisson. Resistivity modelling for arbitrarily shaped three dimensional structures, Report to U.S. Dept of Energy, 1977.
- [10] Loke, M. H., Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, Rev August 17th, Geotomosoft, Malaysia, 2020.

