

## Interpretasi Ukuran Kolom *Grouting Geopolymer* Menggunakan Metode Resistivitas

Sumiyanto <sup>1\*</sup>, Agus Setyo Muntohar <sup>2</sup>, Sri Prabandiyani Retno Wardani <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jenderal Soedirman  
Jl. Prof. Dr. HR. Boenjamin 708 Grendeng Purwokerto, Indonesia 53122

<sup>2</sup> Innovative Ground Improvement Resarch Center, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jl. Brawijaya, Kasihan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia 55183,

<sup>3</sup> Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

### Abstrak

Pada injeksi *grouting*, ukuran kolom *grouting* merupakan indikator penting untuk mengevaluasi keberhasilan penyebaran dan sementasi *grouting*. Pada penelitian di laboratorium, pengukuran kolom *grouting* dapat dilakukan dengan memisahkan antara kolom *grouting* dan tanah. Namun demikian, metode ini bersifat merusak dan hanya cocok untuk penelitian, sehingga tidak dapat diterapkan di lapangan. Metode resistivitas bersifat tidak merusak dan berhasil digunakan untuk interpretasi formasi batuan dyke. Formasi dyke ini mempunyai kemiripan dengan kolom *grouting*, sehingga metode resistivitas berpotensi dikembangkan untuk interpretasi ukuran kolom *grouting*. Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian dilakukan untuk mengembangkan metode resistivitas sebagai metode interpretasi ukuran kolom *grouting*. Penelitian dilakukan di laboratorium menggunakan tanah clay shale yang diinjeksi *grouting geopolymer*. Berdasarkan hasil data pengukuran resistivitas dilakukan inversi untuk menggambarkan profil resistivitas benda uji, menggunakan software Res2dinv. Profil resistivitas pada umur 28 hari menghasilkan interpretasi ukuran kolom *grouting* yang akurat karena terdapat perbedaan resistivitas yang besar antara tanah dan kolom *grouting*. Hasil penelitian ini memberikan peluang metode resistivitas untuk kembangkan lebih lanjut sebagai metode interpretasi ukuran kolom *grouting* dan berpotensi untuk diterapkan di lapangan.

**Kata kunci:** *grouting*; resistivitas; kolom *grouting*; *geopolymer*; formasi Schlumberger

### Abstract

**[Title: Interpretation of Grouted Column Sizes Using the Resistivity Method in the Laboratory]** The size of the grouted column is an essential indicator for evaluating the performance of injection work. In the laboratory, the grouted column is easily measured by separating the grouted column from the surrounding soil. However, this method is destructive and only suitable for research, so it cannot be applied in the field. The resistivity method is non-destructive and has been successfully used for the interpretation of dyke rock formations. This dyke formation has similarities with the grouted column, so the resistivity method has the potential to be developed for interpreting the size of the grouted column. Based on these considerations, research was carried out to develop the resistivity method as a method for interpreting grouted column sizes. The research was carried out in a laboratory using clay shale soil injected with *geopolymer grouting*. Based on the results of the resistivity measurement data, an inversion was carried out to describe the resistivity profile of the test object using Res2dinv software. The resistivity profile at 28 days accurately interprets the size of the grouted column because there is a large difference in resistivity between the soil and the grouted column. The results of this research could be further developed and applied in the field to interpret the size of grouted columns.

---

<sup>\*</sup>) Penulis Korespondensi.  
E-mail: [sumiyanto@unsoed.ac.id](mailto:sumiyanto@unsoed.ac.id)

**Keywords:** *grouting*; resistivity; grouted column; *geopolymer*; Schlumberger formation

## 1. Pendahuluan

*Grouting* merupakan salah satu metode perbaikan tanah dengan prinsip menginjeksikan material *grouting* cair ke dalam rongga atau pori-pori tanah (Cambefort, 1977; Raju & Valluri, 2008; Rawlings et al., 2000; Warner, 2004). Pada awalnya metode ini dikembangkan untuk perbaikan tanah pasir (Abraham et al., 2014; Dano et al., 2004; Kaga & Yonekura, 1992; Ping et al., 2008). Pada perkembangannya metode ini berhasil dikembangkan untuk tanah dari hasil pelapukan batuan (Sumiyanto et al., 2023; Yun et al., 2017). Kelebihan dari metode *grouting* adalah dapat diaplikasikan pada tanah di bawah bangunan (Guo et al., 2020; Ni & Cheng, 2012). Keberhasilan injeksi *grouting* sangat ditentukan oleh radius sebaran *grouting*. Penyebaran *grouting* terjadi secara radial yang dimulai dari lubang bor, mengalir dan menyebar melalui pori-pori tanah sampai radius tertentu (Hou et al., 2019; Yang et al., 2019). Selanjutnya, keberadaan *grouting* pada pori-pori tanah ini akan meningkatkan kepadatan dan membentuk ikatan antar butiran tanah, sehingga terbentuk kolom *grouting* yang kompak (Sumiyanto et al., 2023; Wang et al., 2016). Besarnya radius sebaran *grouting* ini dipengaruhi oleh porositas tanah, viskositas *grouting*, tekanan dan durasi injeksi (Hou et al., 2019; Sumiyanto et al., 2021, 2023).

Ukuran kolom *grouting* yang terbentuk merupakan indikator keberhasilan injeksi *grouting* (Hashimoto et al., 2016; Wang et al., 2016; Yang et al., 2019), yang merupakan kombinasi dari keberhasilan penyebaran *grouting* dan sementasi antar butiran tanah. Berdasarkan pertimbangan tersebut, besarnya kolom *grouting* perlu diukur sebagai indikator evaluasi keberhasilan injeksi *grouting*. Pada penelitian di laboratorium pengukuran kolom *grouting* dapat dilakukan dengan memisahkan antara kolom *grouting* dan bagian yang luarnya, baik secara langsung maupun dengan perendaman (Sumiyanto et al., 2023; Wang et al., 2016). Namun demikian, metode pemisahan ini bersifat merusak sehingga hanya cocok untuk penelitian di laboratorium. Untuk aplikasi di lapangan, metode pemisahan ini tidak dapat dilakukan sehingga diperlukan metode pengujian lain yang mempunyai sifat tidak merusak (*non destructive test*).

Metode resistivitas merupakan salah satu metode geolistrik yang dikembangkan untuk menentukan formasi lapisan batuan dengan mendasarkan pada perbedaan resistivitas antar lapisan bantuan (Telford et al., 1990). Pada perkembangannya, metode resistivitas ini telah dikembangkan untuk keperluan lainnya yaitu penyelidikan beton (Noushini & Castel, 2015) dan stabilisasi tanah (Arsyadi et al., 2017; Bhangale & Bhosale, 2010; Mostafa et al., 2018; Vincent et al., 2017). Pada metode resistivitas, pengukuran dilakukan pada permukaan tanah dengan memasang elektroda dengan formasi tertentu, sehingga bersifat tidak merusak.

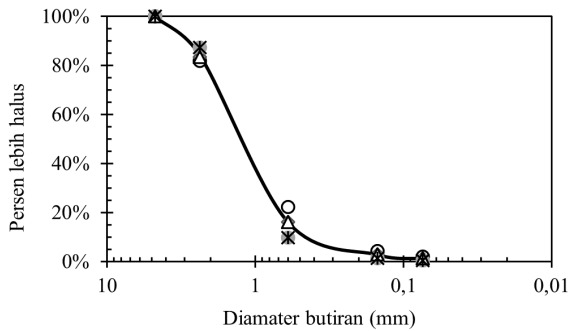
Berdasarkan formasi elektroda, pengujian resistivitas dapat dikelompokkan dalam tiga jenis formasi yaitu Wenner, Schlumberger, dan Dipole-dipole. Metode resistivitas dengan formasi Schlumberger paling cocok digunakan untuk interpretasi formasi *dyke* (Telford et al., 1990; Batayneh, 2001; Nunes et al., 2016). Kolom *grouting* yang terbentuk dari hasil injeksi *grouting* memiliki kemiripan dengan formasi batuan *dyke*, sehingga metode resistivitas berpotensi dikembangkan untuk interpretasi ukuran kolom *grouting*. Pengembangan metode interpretasi ukuran kolom *grouting* dengan metode resistivitas diperlukan untuk maksud mengembangkan metode yang bersifat tidak merusak dan memungkinkan diaplikasikan di lapangan. Untuk maksud tersebut dilakukan penelitian skala laboratorium sehingga hasil interpretasi dengan metode resistivity dapat dibandingkan dengan ukuran kolom *grouting* aktualnya.

Pengembangan metode resistivitas untuk interpretasi ukuran kolom *grouting* ini tidak hanya diperuntukkan pada jenis tanah tertentu, namun untuk keperluan penelitian ini digunakan tanah *clay shale*. Tanah ini merupakan hasil pelapukan dari batuan dan telah mengalami penurunan kuat dukung (Alatas et al., 2016; Yoshida & Hosokawa, 2004; Zhang et al., 2016), sehingga memerlukan perbaikan. Material *grouting* yang digunakan adalah *geopolymer* dari *fly ash*, hal ini dimaksudkan untuk mendukung pengembangan material alternatif yang ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah PLTU. Resistivitas tanah *clay shale* dan *geopolymer* memiliki perbedaan yang besar, dengan resistivitas *clay shale* berkisar antara 10-30  $\Omega$ .m (McCarter, 1984), sedangkan *geopolymer* berkisar antara 80-100  $\Omega$ .m (Noushini & Castel, 2015). Kedua material ini memiliki perbedaan resistivitas yang besar sehingga cocok untuk bahan penelitian.

## 2. Bahan dan Metode

### 2.1. Bahan

Tanah yang digunakan dalam penelitian diambil Desa Limbasari Purbalingga, yang merupakan hasil pelapukan dari batuan *clay shale*. Berdasarkan hasil pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), tanah *clay shale* ini tersusun atas mineral lempung yaitu *Smectite* sebesar 51% dan *Illite* 9%. Hasil pengujian plastisitas didapatkan nilai *liquid limit* (LL) 51,1%, *plasticity index* 26,7%, sedangkan hasil pengujian *specific gravity* didapatkan nilai 2,535. Berdasarkan pengujian Standard Proctor tanah memiliki *maximum dry density* (MDD) dan *optimum moistures content* (OMC) masing-masing sebesar 15,53 kN/m<sup>3</sup> dan 18,59%. Meskipun berdasarkan penyusunannya tanah *clay shale* didominasi oleh mineral lempung, namun berdasarkan pengujian saringan menunjukkan tekstur granular (Gambar 1).

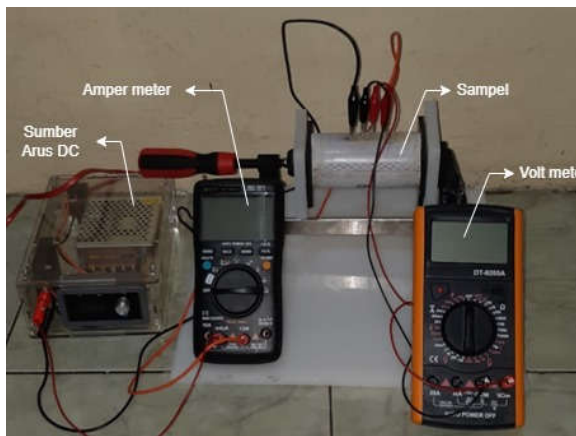


Gambar 1. Gradasi butiran tanah clay shale hasil uji saringan.

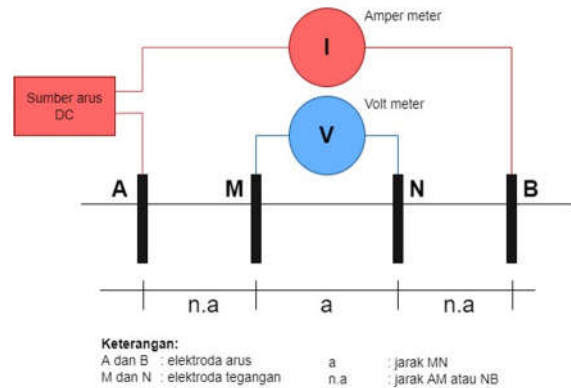
Geopolymer yang digunakan pada penelitian ini adalah fly ash yang diambil dari PLTU Tanjung Jati Jepara. Berdasarkan uji X-Ray Fluorescence (XRF), kandungan utama fly ash adalah SiO<sub>2</sub> (51%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (29%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11%), CaO (5%), and MgO (2%). Sedangkan berdasarkan uji XRD mineral penyusun fly ash adalah Quartz, Mullite, dan Magnetite dengan fase amorphous sebesar 38%. Merujuk pada penelitian Hamza et al. (2019) tentang reologi, geopolymer dibuat dengan perbandingan fly ash dan aktivator sebesar 1:1. Sedangkan komposisi aktivator mengacu pada penelitian Mulyana et al. (2017) dan Qomaruddin (2018), yaitu berupa campuran NaOH (10M) dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dengan perbandingan 1:1. Hasil pengujian properti geopolymer didapatkan nilai berat satuan 18,5 kN/m<sup>3</sup>, viskositas 605 mPa.s, dan waktu ikat awal adalah 35 jam.

2.2. Metode

Pengujian resistivitas dilakukan dalam dua tahap, pengujian material penyusun dan kolom grouting. Pengujian resistivitas material penyusun meliputi pengujian tanah dan geopolymer. Pengujian resistivitas material ini dilakukan pada sampel di dalam tabung PVC



Gambar 3. Setting pengujian resistivitas material terpisah.



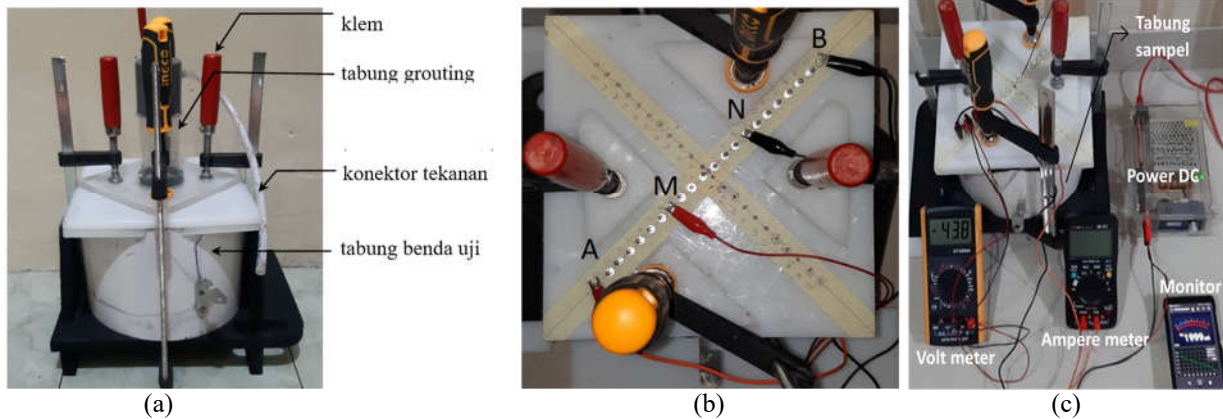
Gambar 2. Skema formasi elektrode pengujian resistivitas.

dengan diameter 46 mm dan panjang 100 mm. Tanah dipadatkan di dalam tabung dengan kepadatan relatif sebesar 0.85 MDD. Pengujian resistivitas tanah dan geopolymer dilakukan menggunakan formasi 4 elektroda dengan jarak masing-masing adalah 10 mm. Skema susunan elektroda disajikan pada Gambar 2 dan setting pengujian disajikan pada Gambar 3.

Pengujian resistivitas pada benda uji tanah di grouting dilakukan di dalam tabung PVC dengan diameter 205 mm dan tinggi 155 mm. Tanah lolos ayakan nomor 4 dimasukkan ke dalam tabung dan dipadatkan untuk mendapatkan kepadatan relatif sebesar 0.85 MDD. Lubang injeksi dibuat ditengah-tengah benda uji dengan diameter 12 mm dan kedalaman 80 mm. Setelah itu, alat injeksi dipasang diatas benda uji seperti disajikan pada Gambar 4.a. Injeksi grouting geopolymer dilakukan dengan memberikan tekanan sebesar 100 kPa selama 20 menit. Setelah dilakukan injeksi grouting, benda uji ditutup dengan lembaran PVC, kemudian di pasang elektroda pada arah diameter dengan spasi 10 mm (Gambar 4.b). Merujuk pada Telford et al., (1990), (Batayneh (2001) dan Nunes et al. (2016), pengujian dilakukan dengan formasi Schlumberger seperti disajikan pada Gambar 5 dan 6. Pengujian resistivitas dilakukan dengan mengalirkan arus DC melalui elektroda A dan B, dan diukur arus yang mengalir melalui kedua elektroda tersebut (Gambar 4.c), sedangkan besarnya beda potensial (voltase) diukur pada elektroda dalam M dan N. Nilai resistivitas (R<sub>o</sub>) dihitung dengan Persamaan 1, dengan nilai n untuk setiap pengujian dihitung dengan Persamaan 2.

$$R_o = \frac{V}{I} \pi \cdot a \cdot n(n+1) \tag{1}$$

$$n = \frac{AB - MN}{2MN} \tag{2}$$



Gambar 4. Penyiapan benda uji (a) persiapan injeksi, (b) pemasangan elektroda, dan (c) pengukuran resistivitas.

Pengujian resistivitas untuk tanah, *geopolymer* dan benda tanah *clay shale* yang digROUTING dilakukan pada umur 7 hari sebagai kondisi jangka pendek dan 28 hari. Interpretasi profil benda uji dilakukan menggunakan *software Res2dinv* berdasarkan nilai  $R_o$ ,  $a$ , dan  $n$  dari seluruh pengujian. Interpretasi ukuran kolom *grouting* dilakukan berdasarkan profil resistivitas tersebut. Komparasi ukuran kolom *grouting* dibandingkan dengan ukuran kolom *grouting* hasil pemisahan dengan cara perendaman di dalam air selama 20 menit.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Resistivitas Tanah dan *Geopolymer*

Hasil pengujian resistivitas secara terpisah antara *clay shale* dan *geopolymer* disajikan pada Gambar 5 dan 6. Pada saat awal pemberian arus listrik terjadi lonjakan tegangan (V), arus (I) dan resistivitas ( $R_o$ ) untuk kedua material. Setelah mengalami lonjakan, nilai  $R_o$  terus mengalami peningkatan sampai pada waktu (t) tertentu dan selanjutnya mendekati konstan. Pada pengujian tanah, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil relatif cepat yaitu sekitar 20 menit, sedangkan pada *geopolymer* membutuhkan waktu lebih lama yaitu sekitar 35 jam. Pengamatan perilaku  $R_o$  *geopolymer* (Gambar 6) menunjukkan meskipun nilai  $R_o$  menuju konstan, namun memerlukan waktu lama untuk mencapai nilai stabil dan nilai  $R_o$  berfluktuasi. Perilaku ini terjadi akibat proses polarisasi selama pemberian arus listrik akibat keberadaan material *amorphous* dari *fly ash* (Wen & Chung, 2001).

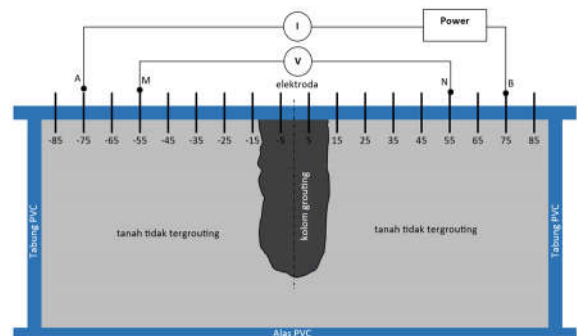
Tabel 1. Perbandingan nilai  $R_o$  tanah dan *geopolymer*

Umur	Clay shale	Geopolymer
7 hari	15	2
28 hari	17	325

Perbandingan nilai  $R_o$  hasil pengujian tanah dan *geopolymer* pada umur 7 dan 28 hari disajikan pada Tabel 1. Nilai  $R_o$  tanah pada umur 7 dan 28 hari terjadi peningkatan meskipun tidak besar, yaitu dari 15  $\Omega.m$  menjadi 17  $\Omega.m$ . Perbedaan resistivitas ini dimungkinkan karena perubahan kadar air (McCarter, 1984; Zohra-Hadjadj et al., 2019). Sedangkan pada *geopolymer* terdapat perbedaan  $R_o$  yang sangat yaitu 2  $\Omega.m$  pada umur 7 hari menjadi 325 pada umur 28 hari. Peningkatan  $R_o$  yang besar pada *geopolymer* ini disebabkan oleh keberadaan aktivator dalam *geopolymer*. Pada awalnya aktivator berfungsi dalam proses *dissolution fly ash*, kemudian dilanjutkan pada proses kondensasi (Garcia-Lodeiro et al., 2015; Palomo et al., 1999). Aktivator merupakan larutan elektrolit basa sehingga bersifat konduktor, hal ini menyebabkan nilai  $R_o$  rendah pada umur-umur awal. Selanjutnya, proses kondensasi menyebabkan *geopolymer* berubah dari cair menjadi matriks padat dan kadar aktivator berkurang, sehingga resistivitasnya menurun (Cai et al., 2020).

3.2. Interpretasi Ukuran Kolom *Grouting*

Nilai  $R_o$  yang dihasilkan dari pengujian benda uji yang di *grouting* adalah nilai  $R_o$  semu (*apparent*



Gambar 5. Skema posisi elektroda AB dan MN pengujian resistivitas benda uji *grouting*.





Keterangan:  
 posisi elektroda arus (AB)  
 posisi elektroda tegangan (MN)

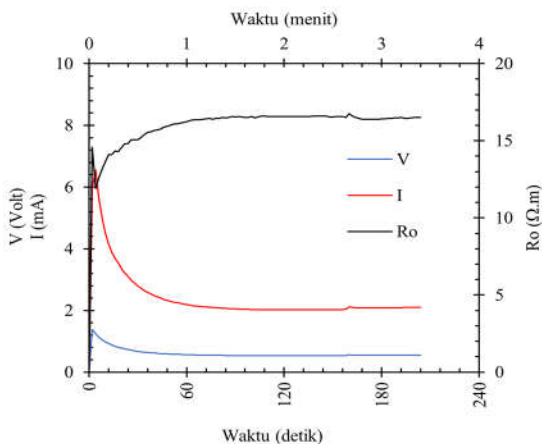
**Gambar 6.** Skema posisi elektroda AB dan MN pengujian resistivitas benda uji *grouting*.

*resistivity*), yaitu nilai  $R_o$  ekuivalen material diantara elektroda MN. Setiap pengujian dengan posisi AB dan MN berbeda akan menghasilkan nilai  $R_o$ . Untuk posisi elektroda MN diluar kolom *grouting*, nilai  $R_o$  yang dihasilkan merupakan nilai ekuivalen dari susunan material secara seri yaitu tanah-*geopolymer*-tanah, sehingga semakin jauh elektrode MN nilai  $R_o$  yang dihasilkan semakin didominasi oleh material tanah.

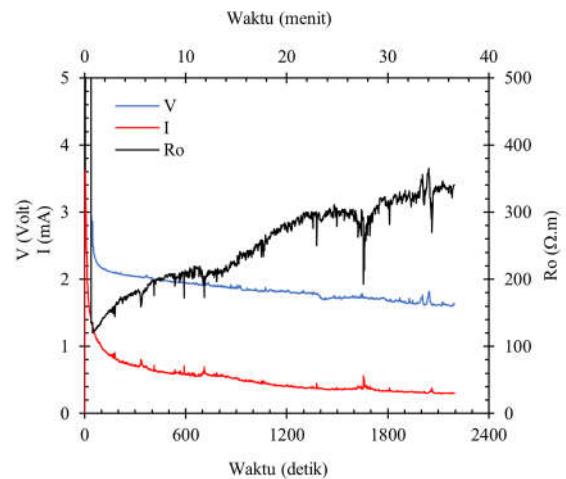
Interpretasi kolom *grouting* yang pertama dilakukan dengan plot data  $R_o$ . Plot data  $R_o$  untuk  $\overline{AB} = 170$  mm pada umur 7 dan 28 hari seperti disajikan pada Gambar 7.a, sedangkan kolom *grouting* aktual disajikan pada Gambar 7.b. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada umur 7 hari tidak didapatkan nilai  $R_o$  yang tinggi ketika elektroda MN mendekati zona kolom *grouting*. Sedangkan pada pengujian umur 28 hari tampak dengan jelas bahwa nilai  $R_o$  meningkat besar ketika elektroda MN mendekati dengan zona kolom *grouting*. Pengaruh umur pengujian ini sesuai dengan hasil pengujian  $R_o$  tanah dan *geopolymer* secara terpisah, dimana perbedaan  $R_o$  pada umur 7 hari relatif kecil, sedangkan pada umur 28 hari terjadi perbedaan  $R_o$  yang besar antara kedua

material. Nilai  $R_o$  pada Gambar 7.a dihasilkan dari pengukuran pada nilai  $\overline{AB}$  tetap yaitu 170 mm, sedangkan  $\overline{MN}$  bervariasi dari 150 mm sampai 10 mm dengan interval 10 mm. Pada nilai  $\overline{MN}$  besar nilai  $R_o$  didominasi oleh material tanah sehingga nilai  $R_o$  rendah mendekati  $R_o$  tanah, sedangkan pada  $\overline{MN}$  kecil nilai  $R_o$  mendekati nilai *geopolymer*. Berdasarkan pengamatan Gambar 7.a, nilai  $R_o$  diperkirakan antara 30-50 mm, nilai ini sesuai dengan diameter aktual yaitu 33 mm (Gambar 7.b). Metode plot nilai  $R_o$  ini dapat memberikan gambaran ukuran kolom *grouting*, namun akurasi pengukuran kolom *grouting* tergantung dari interval variasi  $\overline{MN}$ .

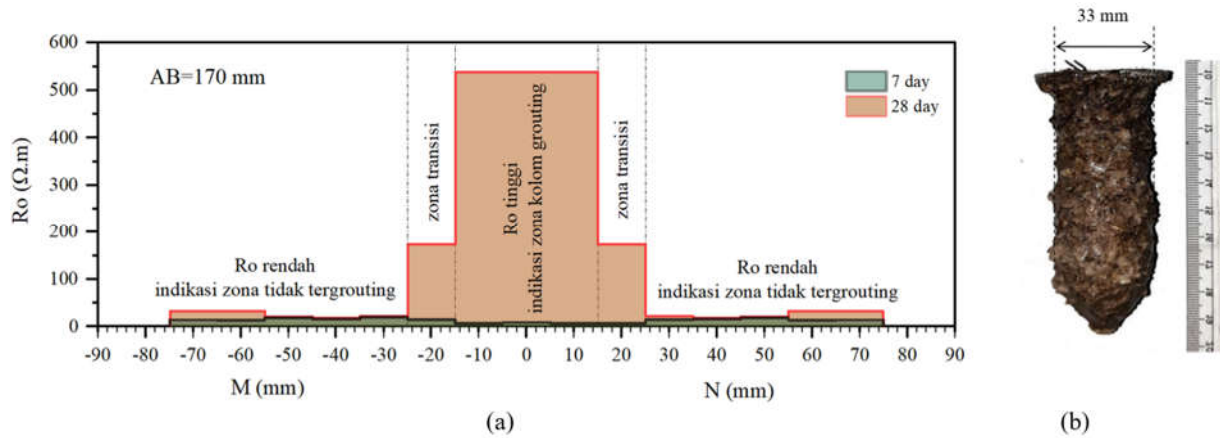
Metode kedua interpretasi ukuran kolom *grouting* dilakukan profil  $R_o$  hasil inversi dengan *software* Res2dinv. Inversi dilakukan berdasarkan nilai  $R_o$ ,  $n$ , dan  $a$  dari setiap data pengukuran  $R_o$  untuk setiap variasi  $\overline{AB}$  dan  $\overline{MN}$ . Profil  $R_o$  hasil inversi disajikan pada Gambar 8.a untuk umur 7 hari dan Gambar 8.b untuk umur 28 hari. Resistivitas hasil inversi data umur 7 hari seperti



**Gambar 7.** Pengujian resistivitas tanah *clay shale*.



**Gambar 8.** Pengujian resistivitas *geopolymer* pada umur 28 hari.

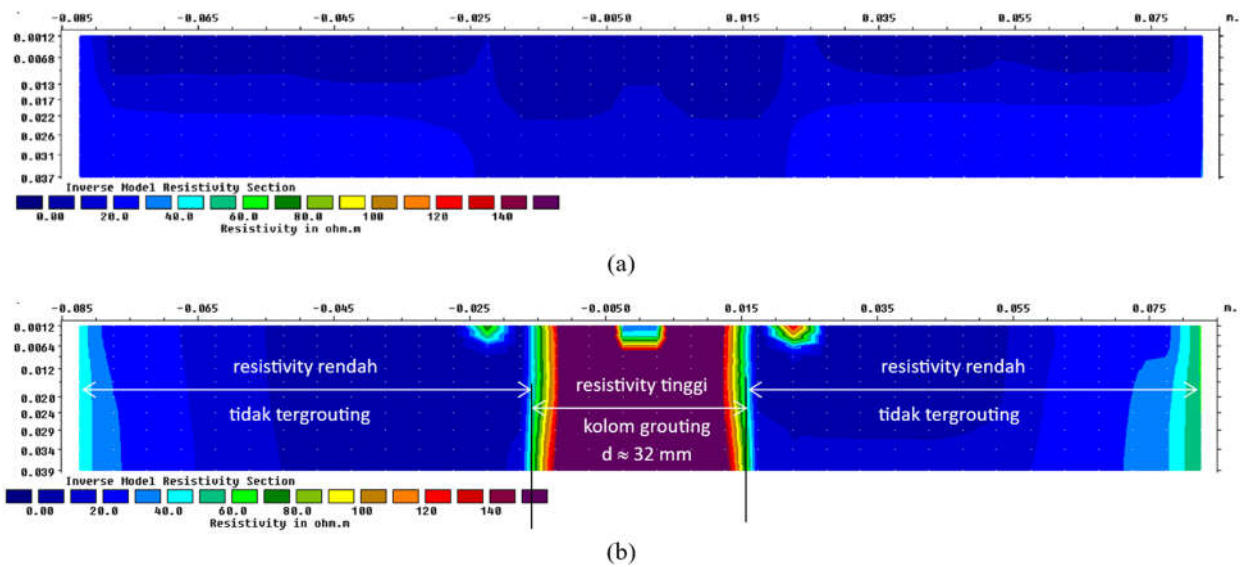


Gambar 9. (a) Plot secara langsung  $R_o$  hasil pengujian tanah yang *digrouting geopolymer* pada  $\overline{AB} = 170$  mm, dan (b) aktual ukuran kolom *grouting*.

disajikan pada Gambar 8.a menunjukkan kesesuaian dengan plot langsung data  $R_o$  (Gambar 7.a), yaitu tidak ada perbedaan yang berarti antara  $R_o$  kolom *grouting* dan *geopolymer*. Demikian pula  $R_o$  pada umur 28 hari,  $R_o$  hasil inversi (Gambar 8.b) sesuai dengan  $R_o$  hasil plot langsung (Gambar 7.a). Pada umur 28 hari (Gambar 8.b) Profil resistivitas hasil inversi pada umur 28 hari menunjukkan batas yang lebih jelas antara tanah dengan kolom *grouting*, dengan diameter  $\approx 32$  mm, sedikit lebih kecil dibandingkan nilai aktualnya yaitu 33 mm (Gambar 7.b). Metode inversi ini memberikan hasil interpretasi yang ukuran kolom *grouting* yang lebih jelas dengan ketelitian yang lebih baik dibandingkan metode plot  $R_o$  secara langsung. Berdasarkan hasil interpretasi diameter

kolom *grouting* antara metode plot langsung  $R_o$  dan metode inversi menunjukkan bahwa metode inversi menghasilkan interpretasi yang lebih baik.

Perbandingan pola  $R_o$  benda uji antara umur 7 hari dan 28 hari menunjukkan kesesuaian antara hasil plot langsung dan inversi. Pada umur 7 hari, kolom *grouting* tidak tampak dengan jelas (Gambar 8.b) karena  $R_o$  kolom *grouting* masih rendah dan hampir sama dengan  $R_o$  dengan tanah. Perbedaan  $R_o$  antara kolom *grouting* dan tanah tampak dengan jelas pada umur 28 hari (Gambar 8.b). Semakin lama  $R_o$  kolom *grouting* semakin tinggi, sehingga perbedaan  $R_o$  antara kolom *grouting* dan tanah di sekitarnya semakin besar. Perilaku ini sesuai dengan karakteristik *geopolymer*, yang mengalami peningkatan



Gambar 10 Perbandingan profil resistivitas tanah dilakukan *grouting* pada umur: (a) 7 hari, dan (b) 28 hari.

resistivitas seiring dengan waktu proses *geopolymerization* (Cai et al., 2020). Perbedaan  $R_0$  yang semakin besar ini akan meningkatkan keberhasilan penggunaan metode resistivitas. Penelitian ini menggunakan *geopolymer* dengan *fly ash* tipe F yang mempunyai kecepatan *geopolymerization* yang lambat, sehingga pengujian pada umur 7 hari tidak berhasil, sedangkan pada umur 28 menunjukkan keberhasilan. Pengaruh umur terhadap keberhasilan pengujian ini tentunya dipengaruhi oleh karakteristik material *grouting* yang digunakan. Perilaku ini sesuai hasil pengujian *geopolymer* secara terpisah (Tabel 1), dapat digunakan sebagai acuan umur pengujian kolom *grouting*.

Metode resistivitas memiliki keterbatasan terkait dengan kedalaman deteksi kolom *grouting*. Pada metode plot data  $R_0$  secara langsung tidak memberikan informasi kedalaman. Pada metode inversi, kedalaman kolom *grouting* dari benda uji yang terdeteksi hanya 37 mm, jauh dibawah dari nilai aktualnya  $\approx 93$  mm. Kondisi ini merupakan keterbatasan metode resistivitas, dimana kedalaman yang dapat dideteksi adalah  $\approx 0,25 \overline{MN}$  terbesar (Telford et al., 1990).

Gagasan penggunaan metode resistivitas untuk interpretasi ukuran kolom *grouting* didasarkan pada keberhasilannya pada formasi *dyke* dan rekahan vertikal menggunakan formasi Schlumberger (Telford et al., 1990; Batayneh, 2001; Nunes et al., 2016). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kolom *grouting* berhasil diinterpretasi menggunakan metode resistivitas. Penelitian ini masih terbatas pada skala laboratorium, *grouting* tunggal, tanah *clay shale* dan *grouting geopolymer*. Namun demikian hasil penelitian ini memberikan peluang untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai metode interpretasi ukuran kolom *grouting*. Berkaitan dengan batasan penelitian ini, penelitian lanjutan masih diperlukan penelitian antara lain penelitian pada multi *grouting*, penelitian pada jenis tanah dan material *grouting* yang lain.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengembangkan metode resistivitas untuk interpretasi ukuran kolom *grouting*. Berdasarkan penelitian di laboratorium dapat ditarik kesimpulan bahwa metode resistivitas berhasil digunakan untuk interpretasi ukuran kolom *grouting* hasil injeksi *geopolymer* pada tanah *clay shale*, yang keduanya memiliki selisih nilai resistivitas yang besar. Profil resistivitas hasil inversi memberikan hasil interpretasi ukuran kolom *grouting* yang lebih akurat dibandingkan dengan metode plot langsung. Kedalaman kolom *grouting* yang berhasil dideteksi adalah  $\approx 0,25$  elektroda voltase ( $\overline{MN}$ ). Keberhasilan interpretasi kolom *grouting* dipengaruhi oleh umur pengujian, yang setara dengan waktu proses sementasi

material *grouting*. Estimasi umur pengujian kolom *grouting* dapat didasarkan pada hasil pengujian resistivitas material *grouting* secara terpisah.

Penelitian menunjukkan potensi penggunaan metode resistivitas sebagai metode interpretasi ukuran kolom *grouting*. Namun demikian penelitian ini masih terbatas untuk *grouting* tunggal pada skala di laboratorium. Penelitian lanjutan masih perlu dilakukan untuk skala yang lebih besar dan untuk benda uji multi *grouting*. Selain itu masih diperlukan penelitian untuk tanah maupun material *grouting* jenis lain.

#### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini.

#### Daftar Pustaka

- Abraham, B. M., Santhosh Kumar, T. G., Sridharan, A., & Jose, B. T. (2014). Strength Improvement of Loose Sandy Soils Through Cement Grouting. *Indian Geotechnical Journal*, 44(3), 234–240. <https://doi.org/10.1007/s40098-013-0073-3>
- Alatas, I. M., Kamaruddin, S. A., Nazir, R., & Irsyam, M. (2016). Effect of weathering on disintegration and shear strength reduction of clay shale. *Jurnal Teknologi*, 78, 93–99. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9491>
- Arsyadi, A. Q., Yadi, K., Sutra, N., & Aryani Soemitro, R. A. (2017). Analisis Respon Resistivitas Sampel Tanah TPA Ngipik Kabupaten Gresik Berdasarkan Uji Resistivitas Skala Laboratorium. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), 2–6. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.23258>
- Bhangale, L. A., & Bhosale, S. S. (2010). Stabilized soil evaluation using laboratory electrical resistivity cell. *Indian Geotechnical Conference*, 343–346.
- Cambefort, H. (1977). The principles and applications of grouting. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 10(2), 57–95. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1977.010.02.01>
- Dano, C., Hicher, P.-Y., & Tailliez, S. (2004). Engineering Properties of Grouted Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(3), 328–338. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:3\(328\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:3(328))
- Guo, C., Cui, C., & Wang, F. (2020). Case Study on Quick Treatment of Voids under Airport Pavement by Polymer Grouting. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(7), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003228](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003228)
- Hamza, G., Cevik, A., Al-Ezzi, K. M. ., & Giilsan, M. E.

- (2019). On The Rheology Of Using Geopolymer For Grouting: A Comparative Study With Cement-Based Grout Included Fly Ash And Cold Bonded Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 196, 594–610.
- Hashimoto, K., Nishihara, S., Oji, S., Kanazawa, T., Nishie, S., Seko, I., Hyodo, T., & Tsukamoto, Y. (2016). Field testing of permeation grouting using microfine cement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 169(2), 134–142. <https://doi.org/10.1680/jgrim.15.00030>
- Hou, F., Sun, K., Wu, Q., Xu, W., & Ren, S. (2019). Grout diffusion model in porous media considering the variation in viscosity with time. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1177/1687814018819890>
- Kaga, M., & Yonekura, R. (1992). Estimation of Strength of Silicate-Grouted Sand. *Soils and Foundations*, 31(3), 43–59. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.31.3>
- McCarter, W. J. (1984). The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Geotechnique*, 34(2), 263–267. <https://doi.org/10.1680/geot.1984.34.2.263>
- Mostafa, M., Anwar, M. B., & Radwan, A. (2018). Application of electrical resistivity measurement as quality control test for calcareous soil. *HBRC Journal*, 14(3), 379–384. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2017.07.001>
- Mulyana, F., Yolanda, T., Nurhuda, I., & Nuroji. (2017). Studi beton geopolimer sebagai substitusi beton konvensional. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 11*.
- Ni, J. C., & Cheng, W. C. (2012). Trial Grouting under Rigid Pavement: A Case History in Magong Airport, Penghu. *Journal of Testing and Evaluation*, 40(1), 1–12. <https://doi.org/10.1520/JTE103776>
- Noushini, A., & Castel, A. (2015). A resistivity-Based Approach to Indicate Chloride Permeability of Geopolymer Concrete. *27th Concrete Institute of Australia Conference, August*, 10.
- Ping, Y., Zhen-bin, P., Yi-qun, T., Wen-xiang, P., & Zhong-ming, H. (2008). Penetration Grouting Reinforced of Sandy Gravel. *Journal of Central South University of Technology*, 15, 280–284. <https://doi.org/10.1007/s11771>
- Qomaruddin, M. (2018). *Pemanfaatan Limbah Batubara untuk Bahan Konstruksi* (1st ed.). CV. MARKUMI.
- Raju, V. R., & Valluri, S. (2008). Practical Applications of Ground Improvement. *Proceeding of Symposium on Engineering of Ground & Environmental Geotechniques*.
- Rawlings, C. G., Hellowell, E. E., & Kilkenny, W. . M. (2000). *Grouting for Ground Engineering*. CIRIA.
- Sumiyanto, Prabandiyani, S. P. R., & Muntohar, A. S. (2023). Stabilisation of Degraded Clay Shale With the Geopolymer Injection Method. *International Journal of GEOMATE*, 24(104), 19–26. <https://doi.org/10.21660/2023.104.3666>
- Sumiyanto, Wardani, S. P. R., & Munthohar, A. S. (2021). The Effect of Soil Porosity and Geopolymer Viscosity on Spreading Grouting in Weathered Clay Shale. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1144(1), 012095. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1144/1/012095>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Vincent, N. A., Shivashankar, R., Lokesh, K. N., & Jacob, J. M. (2017). Laboratory Electrical Resistivity Studies on Cement Stabilized Soil. *International Scholarly Research Notices*, 2017, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2017/8970153>
- Wang, Q., Wang, S., Sloan, S. W., Sheng, D., & Pakzad, R. (2016). Experimental investigation of pressure grouting in sand. *Soils and Foundations*, 56(2), 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.001>
- Warner, J. P. E. (2004). *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock, and Structures*. John Wiley & Sons, Inc.
- Yang, J., Cheng, Y., & Chen, W. (2019). Experimental Study on Diffusion Law of Post-Grouting Slurry in Sandy Soil. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 1–11. <https://doi.org/10.1155/2019/3493942>
- Yoshida, N., & Hosokawa, K. (2004). Compression and Shear Behavior of Mudstone Aggregates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(5), 519–525. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:5\(519\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:5(519))
- Yun, J. W., Park, J. J., Kwon, Y. S., Kim, B. K., & Lee, I. M. (2017). Cement-based fracture grouting phenomenon of weathered granite soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(1), 232–242. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0862-1>
- Zhang, S., Xu, Q., & Hu, Z. (2016). Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China. *Engineering Geology*, 204, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.013>
- Zohra-Hadjadj, F., Laredj, N., Maliki, M., Missoum, H., & Bendani, K. (2019). Laboratory evaluation of soil geotechnical properties via electrical conductivity. *Revista Facultad de Ingenieria*, 90, 101–112. <https://doi.org/10.17533/UDEA.REDIN.N90A11>