

Pengaruh Konsentrasi Larutan Kalsium Klorida terhadap Konduktivitas Listrik dalam Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Elektrokinetik

Lydia Darmiyanti^{1*}, B. M. A. S. Anaconda Bangkara², Prihartanto³ dan Ivan Imanuel⁴

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Krisnadwipayana, Jl. Kampus Unkris, Jakarta

e-mail: lydiadarmiyanti@gmail.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Presiden, Jl. Ki Hajar Dewantara, Cikarang Bekasi

e-mail: anaconda@presiden.ac.id

² Program Studi Teknik Sipil, Universitas Presiden, Jl. Ki Hajar Dewantara, Cikarang Bekasi

e-mail: prihartanto@presiden.ac.id

³ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Presiden, Jl. Ki Hajar Dewantara, Cikarang Bekasi

e-mail: ivanmanuel@presiden.co.id

ABSTRAK

Perbaikan tanah secara elektrokinetik telah dilakukan sebagai alternatif yang efektif untuk meningkatkan daya dukung tanah lempung. Penelitian-penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa metode ini dapat meningkatkan kuat geser tanah dan mengurangi pengembangan tanah. Nilai sudut geser tanah meningkat sementara nilai kohesi tanah menurun. Kondisi ini menyebabkan terjadi peningkatan daya dukung tanah lempung. Metode elektrokinetik memanfaatkan arus listrik yang diterapkan material bersifat konduktor, dimana satu bermuatan positif dan yang lain bermuatan negatif. Perbedaan potensial ini menyebabkan perubahan resistansi tanah lempung, dan memungkinkan zat penstabil mengalir dari anion (bermuatan positif) ke katoda (juga bermuatan positif). Penelitian ini menggunakan zat penstabil larutan kalsium klorida. Tujuan penelitian ini adalah untuk menyelidiki perubahan resistansi tanah akibat variasi konsentrasi larutan yang digunakan dalam perbaikan tanah elektrokinetik. Tiga konsentrasi larutan yang berbeda diterapkan pada tanah lempung dari Jawa Barat, dan ditemukan bahwa terdapat pengaruh yang signifikan terhadap nilai resistansi tanah. Semakin tinggi konsentrasi larutan yang diterapkan pada tanah lempung, semakin besar peningkatan resistansi tanah, yang juga diikuti oleh peningkatan kecepatan aliran larutan tersebut.

Keywords: electrokinetics, clay soil, soil resistance

1. PENDAHULUAN

Tanah lempung tersebar luas di seluruh Indonesia, terutama di Jawa, Kalimantan, Sulawesi, dan Sumatra, yang menutupi sebagian besar wilayah daratan. Tanah ini mengandung mineral seperti illite, montmorillonite, dan kaolinite, serta memiliki karakteristik permeabilitas rendah, plastisitas tinggi, dan kohesi yang kuat. Akibatnya, tanah ini memiliki daya dukung (q_u) yang rendah, yang bervariasi di berbagai daerah, dengan perbedaan yang cukup mencolok tergantung lokasi, seperti di Ci-calengka, Cihideung, Cihampelas, dan Jatisari yang mencatat nilai serendah 7,8 kPa. Daya dukung yang terbatas ini menjadi tantangan dalam pembangunan infrastruktur karena kestabilan tanah sangat penting untuk mendukung struktur. Teknik seperti stabilisasi elektrokinetik terbukti mampu meningkatkan nilai q_u secara signifikan, dengan penelitian menunjukkan peningkatan lebih dari 200% ketika metode tersebut diterapkan (Estabragh et al., 2022; Kaniraj, 2014; Tjandra & Budi, 2009).

Perbaikan tanah elektrokinetik memanfaatkan arus searah (DC) untuk menggerakkan air dan ion melalui tanah, meningkatkan sifat fisiknya (Eriksson & Gemvik, 2014). Keefektifan stabilisasi elektrokinetik bergantung pada faktor-faktor seperti tegangan, jenis dan konsentrasi larutan kimia, waktu aplikasi, serta jenis tanah lempung (D. Darmiyanti et al., 2023; Gingine et al., 2013). Lempung, yang bermuatan negatif, menarik ion bermuatan positif dari larutan stabilisasi, yang masuk ke dalam struktur tanah dan memicu proses pengerasan yang meningkatkan kekuatan tanah. Di antara berbagai larutan kimia yang diuji, kalsium klorida (CaCl_2) terbukti paling efektif dalam meningkatkan kekuatan tanah (Arief Rachmansyah, 2010; L. Darmiyanti et al., 2023). Tegangan yang diterapkan mempengaruhi kecepatan aliran larutan kimia melalui tanah, sehingga mempengaruhi laju dan efektivitas stabilisasi (Ayodele et al., 2018).

Tanah lempung yang luas menjadi perhatian penting dalam rekayasa geoteknik karena kecenderungannya mengalami penyusutan dan pembengkakan sebagai respons terhadap fluktuasi kelembapan. Tanah ini cenderung membengkak selama periode hujan dan menyusut dalam kondisi kering, yang dapat mengurangi daya dukungnya dan berisiko menyebabkan kegagalan struktural (Behnood, 2018). Proses elektrokinetik, yang melibatkan elektroosmosis (pergerakan air melalui tanah) dan elektroforesis (pergerakan partikel terlarut), sangat penting dalam meningkatkan sifat-sifat tanah liat ini. Penerapan arus langsung (DC) menyebabkan air dan ion bermigrasi melalui tanah, sementara agen penstabil, seperti Ca^{2+} , membantu meminimalkan ekspansi tanah liat tersebut, sehingga meningkatkan sifat

mekaniknya, termasuk kekuatan geser dan indeks pembengkakan (L. Darmiyanti et al., 2025; Estabragh et al., 2014).

Selain teknik elektrokinetik, metode stabilisasi tradisional seperti penggunaan kapur (CaO) dan larutan berbasis kapur (Ca(OH)_2) umum digunakan untuk meningkatkan kekuatan geser dan meminimalkan pengembangan tanah liat. Pendekatan ini memanfaatkan efek elektroosmosis, di mana air bergerak dari anoda ke katoda, membantu mengangkut ion stabilisasi ke dalam tanah. Tingkat tegangan yang diterapkan selama perlakuan elektrokinetik mempengaruhi kecepatan dan keberhasilan proses stabilisasi. Penelitian dengan perbedaan konsentrasi larutan perlu dilakukan untuk mengetahui secara signifikan pengaruhnya. Sehingga akan diperoleh kombinasi optimum dari semua variabel yang akan digunakan dalam keberhasilan perbaikan tanah elektrokinetik.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan tanah lempung, dimana pengujian properties tanah dilakukan sesuai dengan standard pengujian pada Tabel 1. Sampel tanah terganggu diambil secara acak dari daerah Jawa Barat.

Tabel 1. Standard pengujian

Nama pengujian	Standard	Unit
Soil moisture	ASTM D2216	%
Liquid Limit, Plastic Limit, Plasticity Index	ASTM D4318	%
Shrinkage Limit	ASTM D4943	C
Specific Gravity	ASTM D854	-
Compaction	ASTM D1557	Kg/m^3
Optimum Moisture Content (OMC)	ASTM D698	V
MDD	ASTM D698	%

Penelitian elektrokinetik menggunakan larutan kalsium klorida dengan tiga variasi konsentrasi, yaitu 5%, 10%, dan 15%. Perbaikan tanah secara elektrokinetik dilakukan sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Lydia et al. (2023). Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan desain Taguchi dengan tiga level dan empat faktor, sehingga menghasilkan 27 percobaan. Dari 27 percobaan tersebut, dilakukan analisis untuk mengetahui pengaruh konsentrasi larutan terhadap resistansi listrik yang dihasilkan. (L. Darmiyanti et al., 2025)

3. ANALYSIS AND DISCUSSION

Hasil pengujian tanah secara fisik dan mekanik ditampilkan dalam Tabel 2.

Table 2. Properties of West Java soil

Properties	Unit	Values
Soil Index Characteristics		
Soil moisture	%	15.6
Liquid Limit	%	59.68
Plastic Limit	%	20.59
Shrinkage Limit	%	1.41
Plasticity Index	%	39.09
Specific Gravity	%	2.62
Soil Classification	%	CH
Grain Size Distribution		
Gravel	%	0
Sand	%	0
Silt	%	20.06
Clay	%	89.902
Compaction	%	-
Optimum Moisture Content (OMC)	%	17.6
MDD	Gr/cm^3	1.31

Properties	Unit	Values
California Bearing Ratio		
CBR(Unsoaked)	%	12.9
CBR (Soaked)	%	1.11
Swelling	%	6.48
Unconfined Compression Test (UCT)		
qu (penjenuhan 60%)	kN/m ²	3.01
Cu (penjenuhan 60%)	kN/m ²	1.52
qu (kadar air OMC)	kN/m ²	10.03
Cu (kadar air OMC)	kN/m ²	5.015

Tanah lempung di Jawa Barat memiliki karakteristik fisik yang menunjukkan plastisitas tinggi, dengan batas cair (LL) sebesar 59,68%, batas plastis (PL) sebesar 20,59%, indeks plastis (PI) sebesar 39,09%, dan berat jenis (Gs) sebesar 2,62. Berdasarkan sistem klasifikasi USCS (ASTM D2487-17, 2017), tanah ini termasuk dalam kelompok CH (Lempung dengan Plastisitas Tinggi) karena memiliki PI lebih dari 50%. Nilai qu yang sangat rendah pada tanah lempung Karawang menunjukkan daya dukung yang sangat rendah dan potensi tinggi untuk mengalami penurunan volume di bawah beban. Karakteristik tanah seperti plastisitas tinggi (indeks plastis 39,09%), kandungan lempung tinggi (89,902%), dan densitas kering maksimum yang rendah (1,31 g/cm³) menunjukkan bahwa tanah dengan plastisitas tinggi cenderung memiliki kekuatan geser dan daya dukung yang rendah, terutama dalam kondisi jenuh. Hasil pengujian mikrostruktur menggunakan XRD digunakan untuk menentukan mineralogi tanah. Mineralogi tersebut kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak Match! dengan pencocokan berdasarkan sudut 2 θ . Hasil mineralogi dari tanah asli ditampilkan dalam Tabel 3.

Table 3. Mineralogy of West Java clay soil

Name of Mineral/Compound	Category/ Group
Illitee	illitee
Paragonite	Group Illitee
Muscovite	Group Illitee
Muscovite-2M1	Group Illitee
Phengite	Group Illitee
Si _{2.92} Ti _{0.005}	Group Illitee
Potassium aluminium silicate hydrate (Muscovite 2M1)	Group Illitee
Tobelite	Group Illitee
Phengite	Group Illitee
(K _{0.94} Na _{0.06}) (Mg _{0.08} Al _{1.75} Fe _{0.15} Mn _{0.02})	Other minerals
((Al _{0.92} Si _{3.08}) O ₁₀) (O H) ₂	
K (Al _{2.9} Si _{3.1} O ₁₀) (O H) ₂	Other minerals
Rb ₂ (B ₁₀ H ₁₀)	
K (Al _{0.62} Li _{0.38}) ₂ Li _{0.92} (Si _{3.58} Al _{0.42} O ₁₀) (OH) _{0.485}	Other minerals
F _{1.515}	
Cs ₂ (B ₁₂ H ₅ F _{7.09}) (H ₂ O)	Other minerals
((Mg Al) (Si ₄ O ₁₀ (H ₂ O) ₂ (O H))) (H ₂ O) ₂	-
Palygorskite	-
Phengite-2M1	Group Illitee

Albite	-
Li Lu (S O ₄) ₂	-
Li Zr ₂ (P O ₄) ₃	-

Tabel 3 menunjukkan mineralogi tanah di Jawa Barat yang mengandung illite, dan nilai AC-nya menunjukkan bahwa tanah tersebut memiliki aktivitas rendah. Menurut Skemton, tanah dengan nilai AC sebesar 0,43% termasuk tidak aktif dan memiliki potensi pengembangan yang rendah.

Electroosmotic Permeability(k_e)

Koefisien permeabilitas elektroosmosis merupakan parameter penting dalam proses elektrokinetik. Nilai k_e tanah lempung setelah 6 hari, 9 hari, dan 12 hari aplikasi elektrokinetik dengan tegangan 15V, 18V, dan 24V menunjukkan peningkatan, dan disajikan pada Tabel 4.

Table 4. Electroosmosis coefficient of clay soil with variation in solution concentration,

Type of soil	Larutan	Implementation Time (days)	Voltage (V)	k_e (m ² /V.s)
Lempung	CaCl ₂ 5%	6	15	$7,74 \times 10^{-10}$
		9	18	$4,30 \times 10^{-10}$
		12	24	$2,42 \times 10^{-10}$
	CaCl ₂ 10%	6	15	$7,91 \times 10^{-10}$
		9	18	$4,40 \times 10^{-10}$
		12	24	$2,48 \times 10^{-10}$
	CaCl ₂ 15%	6	15	$8,00 \times 10^{-10}$
		9	18	$4,50 \times 10^{-10}$
		12	24	$2,53 \times 10^{-10}$

Tabel 4 menunjukkan pengaruh tegangan pada nilai k_e pada setiap konsentrasi larutan. Nilainya berkurang seiring dengan meningkatnya tegangan yang diterapkan. Efek konsentrasi larutan pada nilai k_e pada tegangan dan waktu aplikasi yang sama adalah bahwa nilainya cenderung meningkat dengan meningkatnya konsentrasi CaCl₂. Pengaruh waktu aplikasi pada nilai k_e pada tegangan dan konsentrasi yang sama adalah nilainya cenderung menurun seiring bertambahnya waktu penerapan elektrokinetik.

Hasil ini sesuai dengan teori elektrokinetik, yang menyatakan bahwa peningkatan konsentrasi elektrolit dan tegangan listrik mempengaruhi nilai k_e , konsisten dengan penelitian sebelumnya oleh Asadi et al. (2013) dan Estabragh et al. (2016).

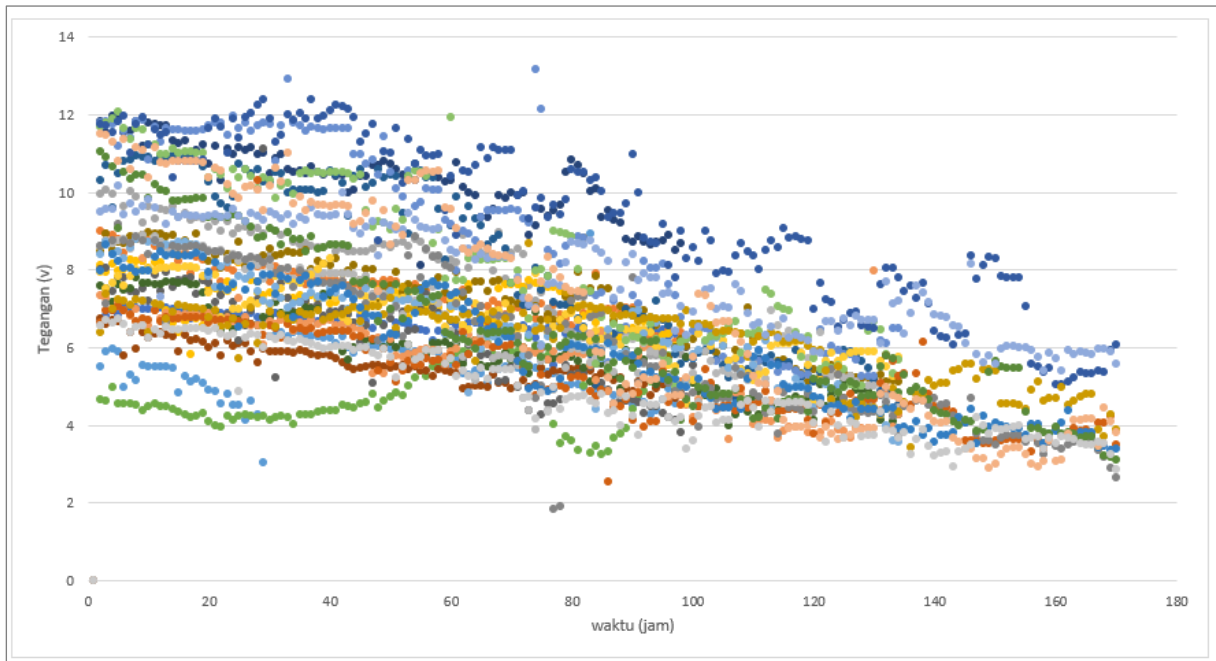
Hambatan listrik dipengaruhi oleh tegangan dan arus yang terjadi di tanah, yang distabilkan oleh elektrokinetika dengan variasi tegangan. Besarnya hambatan listrik di tanah liat diketahui dari persamaan.

$$V = IR$$

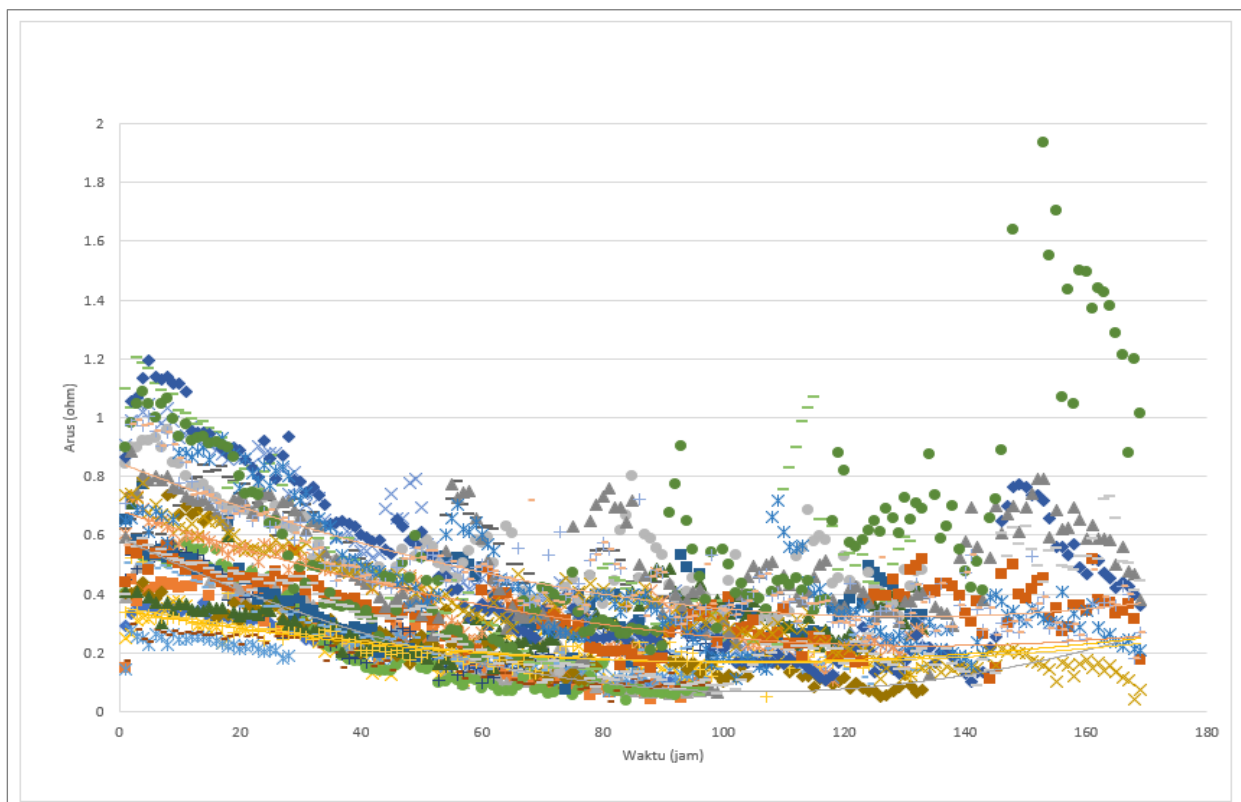
Where I is the electric current (Ampere), V is the voltage (volt), and R is the resistance (Ohm).

Resistansi

Tegangan dan arus untuk setiap percobaan yang diukur ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Tegangan listrik yang terjadi selama stabilisasi elektrokinetik untuk 27 percobaan

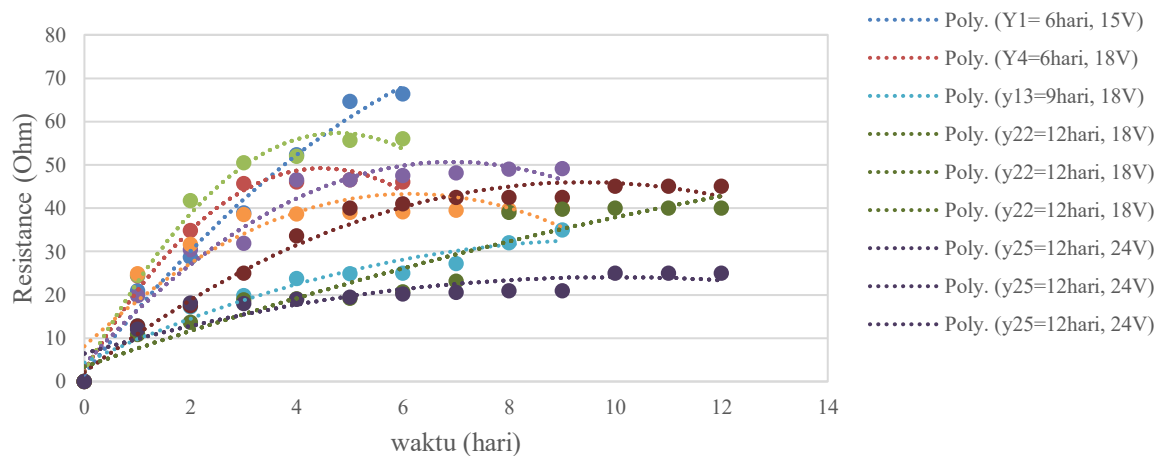


Gambar 2. Arus listrik yang terjadi selama stabilisasi elektrokinetik untuk 27 percobaan

Pola tegangan dan arus yang diamati dalam semua percobaan memiliki kesamaan pola. Ada penurunan tegangan dan arus selama durasi aplikasi elektrokinetik. Tegangan dan arus untuk setiap variasi waktu aplikasi elektrokinetik ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Hasil tegangan dan arus dalam penelitian ini konsisten dengan temuan dari berbagai penelitian sebelumnya tentang distribusi arus listrik di tanah selama proses elektrokinetik. Penelitian oleh Ozkan et al. (1999) dan lainnya mengungkapkan pola penurunan arus dan tegangan yang serupa di tanah lempung yang distabilkan secara elektrokinetik. (Micic et al., 2003).

Efek Larutan CaCl_2 5% pada Resistansi Listrik

Perubahan tegangan dan arus menyebabkan perubahan hambatan listrik. (Gambar 3 – Gambar 5).

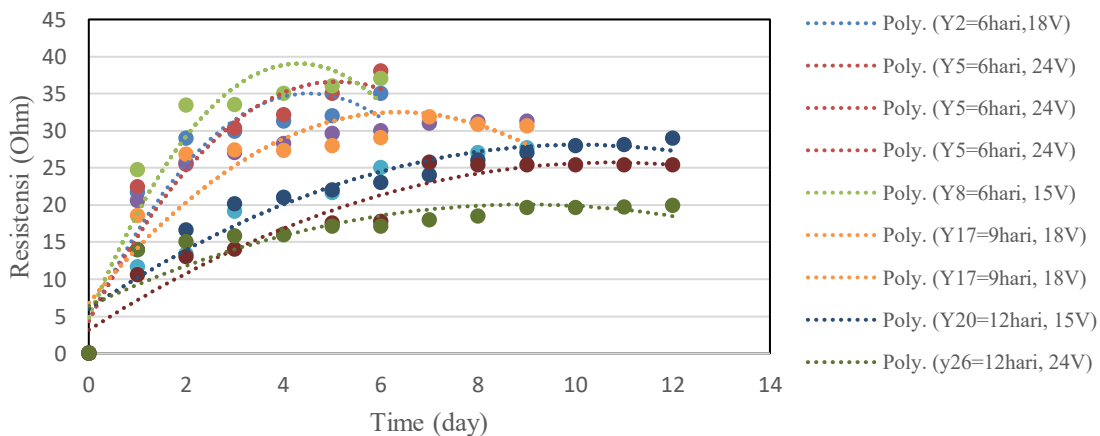


Gambar 3. Resistansi listrik di pada perbaikan tanah lempung elektrokinetik dengan 5% CaCl_2

Dari Gambar 3, dapat dilihat bahwa pola peningkatan hambatan listrik dari waktu ke waktu terjadi pada semua percobaan perbaikan tanah elektrokinetik dengan konsentrasi CaCl_2 sebesar 5%.

Efek Larutan CaCl_2 10% pada Hambatan Listrik

Hambatan listrik yang ditemui pada tanah yang stabil dengan 10% CaCl_2 ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Resistansi listrik di pada perbaikan tanah lempung elektrokinetik dengan 10% CaCl_2

Dalam 3 hari pertama, resistansi meningkat pesat karena migrasi ion intensif di bawah pengaruh medan listrik. Setelah hari ke-5, hampir semua kurva menunjukkan perlambatan peningkatan resistansi, menunjukkan bahwa lapisan ganda listrik pada elektroda mulai stabil. Untuk durasi yang lebih lama (9-12 hari), resistansi tetap stabil, menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kesetimbangan elektrokinetik.

Efek Larutan CaCl_2 15% pada Resistansi Listrik

Pada Gambar 5, dapat dilihat bahwa seiring dengan meningkatnya tegangan, resistansi juga meningkat. Resistensi tetap konsisten pada hari ke-5 atau ke-6.

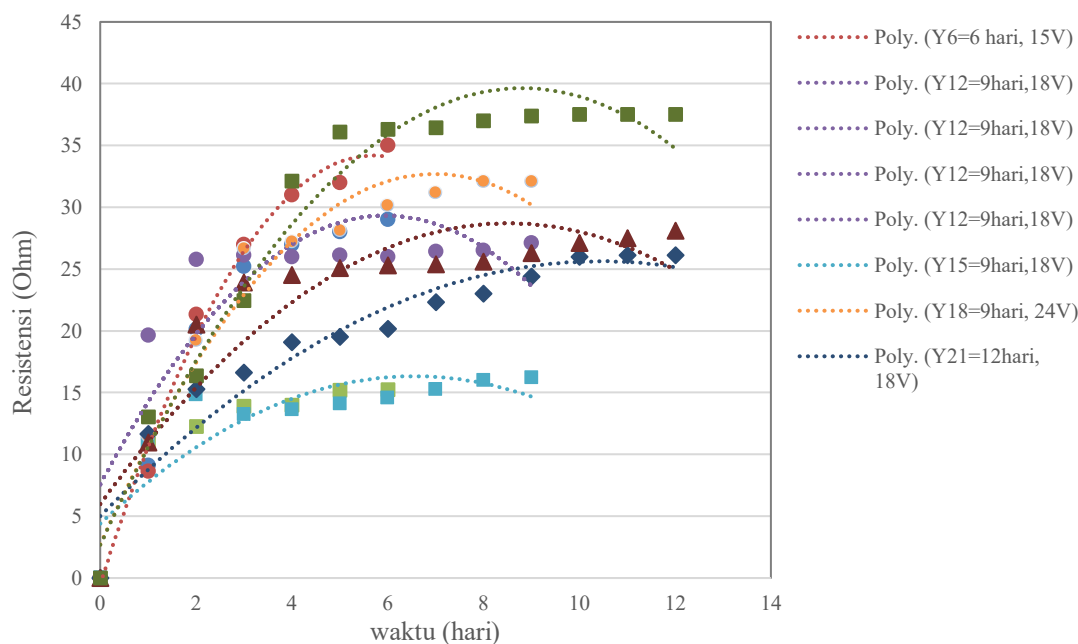


Figure 5. Resistansi listrik di pada perbaikan tanah lempung elektrokinetik dengan 15% CaCl_2

Tegangan dan arus listrik mempengaruhi pergerakan ion dalam larutan elektrolit dan bagaimana hubungannya dengan resistansi sistem. Dalam grafik resistansi larutan CaCl_2 15%, setelah tegangan yang diterapkan dibagi dengan arus, resistansi listrik tanah liat diperoleh. Hambatan listrik tanah pada awalnya rendah dan kemudian meningkat seiring waktu selama pemrosesan, mencapai nilai yang hampir konstan. Hal ini dapat disebabkan oleh fakta bahwa injeksi larutan aditif menghasilkan peningkatan arus di dalam sampel, yang pada gilirannya mengurangi hambatan listrik awal tanah. Saat waktu pemrosesan meningkat, hambatan listrik meningkat karena penurunan arus listrik yang melewati sampel.

4. CONCLUSION

Penelitian ini bertujuan mencari dampak konsentrasi larutan kalsium klorida (CaCl_2) terhadap hambatan listrik tanah lempung selama perbaikan tanah elektrokinetik. Hasilnya menunjukkan efek signifikan konsentrasi larutan pada ketahanan tanah, di mana konsentrasi CaCl_2 yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan hambatan listrik. Perilaku ini juga ditemukan konsisten dengan teori elektrokinetik, yang menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi dan tegangan elektrolit memengaruhi resistensi tanah dengan memfasilitasi migrasi ion.

Melalui perbaikan tanah elektrokinetik, tanah lempung dari Jawa Barat yang ditandai dengan plastisitas tinggi dan daya dukung rendah menunjukkan peningkatan nilai resistansinya dari waktu ke waktu. Penggunaan larutan CaCl_2 5%, 10%, dan 15% menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasinya, semakin besar peningkatan ketahanan tanah, yang pada gilirannya, meningkatkan proses stabilisasi secara keseluruhan.

Temuan menunjukkan bahwa perbaikan tanah elektrokinetik, terutama dengan larutan kalsium klorida, memiliki potensi yang signifikan untuk meningkatkan sifat mekanik tanah liat yang luas. Metode ini tidak hanya membantu mengurangi karakteristik pembengkakan dan penyusutan tanah tersebut, tetapi juga meningkatkan kekuatan geser dan daya dukungnya. Studi ini menggarisbawahi pentingnya konsentrasi larutan dan variasi tegangan dalam mengoptimalkan efektivitas stabilisasi tanah elektrokinetik untuk pembangunan infrastruktur di daerah dengan tanah liat yang bermasalah.

REFERENCES

- Arief Rachmansyah, Y. Z. (2010). *Model Test Perbaikan Tanah dengan Metode Injeksi Elektrokimia*.
- Ayodele, A. L., Pamukcu, S., Shrestha, R. A., & Agbede, O. A. (2018). Electrochemical Soil Stabilization and Verification. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(2), 1283–1293. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0392-8>
- Behnood, A. (2018). Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques. *Transportation Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2018.08.002>

- Darmiyanti, D., Rachmansyah, A., Munawir, A., Zaika, Y., Ershandy, & Suryo, E. A. (2023). Voltage optimization in expansive soil improvement with saline solution on swelling and shear strength. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1263(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1263/1/012050>
- Darmiyanti, L., As'ad, M., Rachmansyah, A., Zaika, Y., & Suryo, E. A. (2025). Evaluating the Effects of Electrokinetic Stabilization Variables on Atterberg Limits and Shear Strength of Clay Soil Using Taguchi Method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(6(133)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.317995>
- Darmiyanti, L., Munawir, A., Rachmansyah, A., Zaika, Y., & Suryo, E. A. (2023). Identification of the Influence of Electrokinetic Soil Improvement on the Microstructure, Physical and Mechanical Properties of Expansive Soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6(126)), 41–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290234>
- Eriksson, F., & Gemvik, L. (2014). *Electro-Osmotic Treatment of Soil – A Laboratory Investigation of Three Swedish Clays*. 116.
- Estabragh, A. R., Kazemi, A., Javadi, A. A., & Moghadas, M. (2022). Stabilisation of a clay soil by injection of different ions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 175(4), 261 – 276. <https://doi.org/10.1680/jgrim.20.00050>
- Estabragh, A. R., Nasch, M., & Javadi, A. A. (2014). Improvement of clay soil by electro-osmosis technique. *Applied Clay Science*, 95, 32–36. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.019>
- Gingine, V., Shah, R., Venkata Koteswara Rao, P., & Hari Krishna, P. (2013). A review on study of Electrokinetic stabilization of expansive soil. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 6(2), 176–181.
- Kaniraj, S. R. (2014). Soft Soil Improvement by Electroosmotic Consolidation. *International Journal of Integrated Engineering*, 6(2), 42–51.
- Lydia Darmiyanti, U. W. (2024). Effect of Salt Solution in Electrochemical Stabilization with Variation of Potential Difference on Clay ' s Shear Strength. *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, 9(1), 28–40. <https://jurnal.unitri.ac.id/index.php/rekabuana/article/view/5434>
- Micic, S., Shang, J. Q., & Lo, K. Y. (2003). Improvement of the load-carrying capacity of offshore skirted foundations by electrokinetics. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 949–963. <https://doi.org/10.1139/t03-045>
- Mitchell, J. K., Soga, K., & Wiley, J. (2005). *Fundamental of soil behavior*.
- Tjandra, D., & Budi, G. S. (2009). *Pengaruh Elektrokinetik Terhadap Peningkatan Daya Dukung Tanah Lempung Lunak*.