

**PENGARUH INJEKSI ELEKTROKIMIA
LARUTAN CaCl_2 10% PADA TEGANGAN 1,5 V/CM
TERHADAP KUAT GESER LEMPUNG PASIRAN**

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun oleh :

**DIAN AYU RIZKY
0510610013 – 61**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2010**

RINGKASAN

Dian Ayu Rizky, 0510610013-61. *Pengaruh injeksi elektrokimia Larutan CaCl_2 10% pada tegangan 1,5 v/cm Terhadap kuat geser lempung pasiran*. Jurusan Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, 2010. Dosen Pembimbing : Arief Rachmansyah dan Suroso.

Fenomena elektrokinetik yang menjelaskan hubungan antara aliran air dengan aliran listrik pertama kali ditemukan oleh Reuss tahun 1809. Dalam bidang geoteknik fenomena ini pertama kali dimanfaatkan oleh Casagrande tahun 1952 untuk menurunkan kandungan air (dewatering) pada tanah berbutir halus, sehingga kuat gesernya meningkat. Sejak saat itu metode ini cukup luas digunakan di beberapa negara Eropa daratan untuk perbaikan tanah berbutir halus. Tujuan penelitian ini dilakukan untuk memperbaiki sifat tanah kohesif, terutama mengetahui pengaruh besar voltase terhadap kuat geser tanah (*shear strength*) melalui metode electro-chemical injection.

Metode *electrochemical injection* adalah metode yang memanfaatkan beda potensial untuk mengalirkan zat atau larutan yang dapat terpolarisasi. Larutan yang dihasilkan harus ramah lingkungan. Pada penelitian menggunakan larutan CaCl_2 10%, dengan beda potensial 1,5 V/cm untuk mentransport larutan, serta konstruksi dan susunan antar katoda berjarak 18 cm berbentuk segi enam dengan tinggi 20 cm. Penelitian dilakukan selama Pengujian kuat geser tanah sebelum dan sesudah diinjeksi elektrokimia dilakukan dengan SNI yang berlaku.

Pada penelitian ini terlihat adanya kecenderungan peningkatan kuat geser tanah yang sebanding dengan volume air yang keluar. Hasil uji triaxial menunjukkan nilai sudut gesek dalam tanah setelah perbaikan tanah dengan injeksi larutan CaCl_2 mengalami peningkatan yang cukup tinggi dan kohesi tanah mengalami penurunan jika dibandingkan dengan sebelum perbaikan tanah dalam keadaan OMC yaitu sudut gesek tanah mengalami peningkatan sebesar $1,547^\circ$ dan kohesi tanah mengalami penurunan sebesar $0,187 \text{ kg/cm}^2$. Dan pada pengujian unconfined mengalami peningkatan yang tidak terlalu tinggi jika dibandingkan dengan sebelum perbaikan tanah dalam keadaan OMC yaitu sebesar $0,01 \text{ kg/cm}^2$ atau 1 kN/m^2 . Peningkatan kuat geser terjadi karena ada penambahan senyawa klorida atau garam yang sifatnya meningkatkan kadar kepadatan tanah. Selain itu apabila kapur bereaksi dengan tanah lempung atau dengan silika hidrat (SiO_2) maka akan membentuk gel yang kuat dan keras yaitu kalsium silikat yang fungsinya untuk melapisi dan mengikat antar partikel tanah lempung.

Kata Kunci: Larutan CaCl_2 , lempung pasiran, kuat geser, injeksi elektrokimia

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan dunia konstruksi saat ini menuntut para ahli untuk mencari terobosan-terobosan baru di bidang teknologi konstruksi. Banyak penemuan baru yang telah tercipta dan mampu memberikan nilai tambah dalam dunia konstruksi. Pengenalan teknologi konstruksi tersebut terasa menjadi suatu kewajiban bagi para praktisi maupun akademisi teknik sipil untuk mengetahuinya. Salah satu teknologi konstruksi yang cukup berkembang pesat adalah dalam bidang perbaikan tanah.

Perbaikan tanah merupakan usaha untuk meningkatkan kekuatan, menurunkan permeabilitas atau pemampatan dan memperbaiki sifat-sifat mekanis tanah yang lain. Perbaikan ini dapat dilakukan dengan drainase, pemadatan atau preloading. Di antara banyak metode tersebut pada prinsipnya metode yang paling cocok tergantung pada jenis tanah yang akan diperbaiki.

Banyak metode yang dapat dipakai untuk memperbaiki sifat mekanis tanah lempung, salah satunya adalah *electro-chemical injection*. Dalam metode ini kita menggunakan perantara aliran listrik searah atau DC (*direct current*) untuk mengalirkan partikel-partikel ionik semen berbutir halus dengan memanfaatkan fenomena elektroosmosis, yakni aliran zat yang terpolarisasi sebagai akibat beda potensial atau adanya arus listrik. Beda tegangan antara dua kutub elektrode menyebabkan timbulnya aliran partikel-partikel semen, di mana partikel-partikel semen tersebut menggantikan/mengisi ruang-ruang pori kosong yang telah ditinggalkan oleh air pori. Air pori dalam tanah cenderung bergerak mendekati katode (kutub negatif) karena kandungan kation bebasnya. Melalui proses penyuntikan semen ini diharapkan akan terjadi peningkatan kuat geser tanah yang cukup signifikan akibat timbulnya pengikatan material-material penyusun tanah.

Penelitian terdahulu pernah dilakukan oleh Draganov (1988) di Jerman yaitu pemadatan tanah lempung pada bantalan jalan kereta api yang terdiri dari tumpukan lempung kecap air dan dilakukan oleh Azzam (1997) di Jerman yaitu pemadatan tanah berpasir pada pondasi gereja St. Nikolaus di Walbeck-Geldern

secara elektrokimia. Sebelum penerapan di lapangan, dilakukan percobaan pemadatan tanah secara elektrokimia oleh Azzam di laboratorium dan di lapangan.

Percobaan di laboratorium, sampel tanah yang diambil akan diperiksa di laboratorium kimia dengan menggunakan alat uji khusus untuk mendapatkan pemadatan di zone anoda, katoda serta daerah peralihannya dengan menggunakan bahan kimia tertentu dalam kondisi tertentu. Untuk mendapatkan evolusi reaksi yang optimal serta daya hantar listrik yang dibutuhkan, pasir halus yang bermasalah tadi dibasahi dengan larutan elektrolit. Di laboratorium telah diselidiki cara untuk memadatkan tanah dengan menggunakan pengendapan karbonat. Sampel tanah yang telah diambil diletakkan dalam dua reservoir, kemudian dilanjutkan dengan injeksi bahan kimia baik di anoda maupun katoda. Tegangan yang dipasang besarnya 1 volt/cm. Digunakan susunan elektroda katoda-anoda, elektroda besi bertegangan 1 volt/cm ditancapkan.

Percobaan di lapangan, dilakukan rehabilitasi tanah secara elektrokimia dengan menggunakan probe DPL agar hasil injeksi bisa diketahui. Dengan menggunakan probe khusus, pada titik-titik injeksi yang telah ditetapkan diisi dengan pipa PVC sedalam 1,7 m untuk mengisolir elektroda di daerah pengisian dari bidang tanah dan untuk menghindari material-material tanah runtuh pada saat fase instalasi. Untuk menetapkan posisi pertama pada daerah yang akan dipadatkan, dilakukan pemeriksaan dengan menggunakan probe (1,7 m hingga 2,7 m di bawah batas atas tanah). Selanjutnya, pada meter bagian dalam dibenamkan batang injeksi hingga 2,7 m di bawah tepi atas tanah. Interval elektroda yang bersesuaian adalah 1 m. Tegangan yang digunakan adalah 80 V, yang berarti 0,8 V/cm.

Penerapan di lapangan, dipilih metode pemadatan dengan menggunakan karbonat berdasarkan percobaan pendahuluan. Rehabilitasi pemadatan tanah pada pondasi gereja St. Nikolaus harus dilakukan dengan dua seri injeksi dalam daerah pondasi menara genta. Injeksi pertama dengan menginjeksikan karbonat yang terdiri dari elektroda-elektroda yang ditanam secara miring di depan pondasi gereja dan injeksi kedua ditanam langsung di bawah pondasi gereja, sehingga diperlukan sejumlah lubang besar pengeboran pada pondasi. Setelah pelaksanaan

pemadatan tanah secara elektrokimia, lubang-lubang pengeboran dari seri injeksi yang kedua ditekan dengan bahan pengikat yang halus. Dengan demikian pada saat yang sama ruang-ruang yang terdapat diantara pondasi dan bangunan dasar serta di daerah pondasi terisi dengan bahan pengikat.

Hasil percobaan di laboratorium, didapatkan banyak terjadi pemadatan di daerah katoda. Di daerah anoda tidak mengalami pemadatan, namun reaksi besi yang telah diuraikan dapat teramati. Setelah pemutusan tegangan serta pengeringan sampel tanah, pemadatan masih tetap berlanjut. Hasil percobaan di lapangan, didapatkan adanya peningkatan aktivitas pemadatan melalui reaksi karbonat yang dilarutkan dengan air akan membuat partikel-partikel tanah saling melekat sehingga kuat geser tanah meningkat. Hasil penerapan di lapangan, setelah tindakan rehabilitasi tanah secara elektrokimia menunjukkan bahwa pemadatan tanah telah tercapai. Namun kuat geser tanahnya belum memperlihatkan hasil sebagaimana yang telah diharapkan di bawah pondasi gereja St. Nikolaus. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan metode injeksi elektrokimia untuk menentukan kuat geser tanahnya.

1.2 Identifikasi Masalah

Metode perbaikan tanah yang sering digunakan pada jasa konstruksi kita cenderung tidak mengatasi masalah utama dari kestabilan tanah lempung yaitu sifat tanah lempung yang cenderung mudah menyerap air. Pada penelitian akan dicari pengaruh besar voltase elektroda dan pengaruh konsentrasi larutan CaCl_2 terhadap kuat geser tanah lempung pasir.

1.3 Batasan Masalah

Di dalam penelitian ini dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut :

1. Jenis tanah yang digunakan adalah tanah lempung pasir (lempung kaolinit 70 % dan pasir halus 30 %).
2. Larutan yang digunakan adalah CaCl_2 dengan konsentrasi 10%.
3. Besar voltase yang digunakan adalah 1.5 volt.

4. Faktor – faktor luar misalnya: suhu ruangan, kelembaban dan sebagainya selama penelitian diabaikan.
5. Air yang digunakan untuk larutan adalah air suling.

1.4 Rumusan Masalah

Dengan memperhatikan batasan-batasan masalah yang telah diuraikan maka permasalahan dalam studi ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana kuat geser tanah lempung pasir sebelum mengalami perbaikan?
2. Bagaimana pengaruh larutan CaCl_2 10 % terhadap kuat geser tanah lempung pasir apabila diinjeksikan dengan beda potensial 1,5 V/cm?
3. Berapa peningkatan kuat geser lempung pasir setelah perbaikan?
4. Apakah terbentuk mineral baru pada tanah lempung setelah perbaikan?

1.5 Maksud Dan Tujuan

Tujuan penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh jenis larutan dan besar voltase ketika penginjeksian terhadap kuat geser tanah (shear strength) sebelum dan setelah perbaikan. Karena tanah kohesif mempunyai permeabilitas rendah, maka diperlukan metode untuk menginjeksikan larutan semen atau bahan lain yang dapat berfungsi sebagai pengikat atau pelapis mineral lempung agar kemampuan menyerap airnya menurun. Selain itu untuk mengetahui fenomena lain yang terjadi seperti pengaruhnya terhadap perubahan voltase akibat berkurangnya air serta untuk mengetahui adanya senyawa baru yang terbentuk akibat injeksi larutan kimia terhadap tanah lempung.

1.6 Manfaat

Dengan menggunakan alat uji yang relatif kecil diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh besar voltase pada penggunaan metode electro-chemical injection sebagai salah satu metode perbaikan tanah khususnya pada tanah lempung.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kuat Geser Tanah

Keruntuhan geser tanah lebih diakibatkan oleh gerak relatif antar butirnya dan bukan disebabkan kehancuran butiran. Oleh karena itu kekuatan tanah tergantung kepada gaya-gaya yang bekerja antar butirnya. Dengan demikian kuat geser tanah dapat dianggap terdiri dari dua komponen:

1. Bagian yang bersifat kohesi yang tergantung kepada macam tanah dan kepadatan butirnya.
2. Bagian yang mempunyai sifat gesekan (*frictional*) yang sebanding dengan tegangan efektif yang bekerja pada bidang geser.

Gaya geser yang diimbangi oleh gaya tahan geser adalah perlawanan geser (*shearing resistance*). Perlawanan geser maksimum adalah kekuatan geser (*shearing strength*) yang melibatkan parameter-parameter kekuatan tanah seperti kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ).

Kuat geser tanah adalah kemampuan tanah untuk melawan tegangan geser yang terjadi pada saat terbebani. Pada peristiwa kelongsoran suatu lereng berarti telah terjadi pergeseran dalam butir-butir tanah tersebut. Kekuatan geser yang dimiliki oleh suatu tanah disebabkan oleh :

- Pada tanah berbutir halus (kohesif) misalnya lempung kekuatan geser yang dimiliki tanah disebabkan oleh kohesi atau lekatan antar butir-butir tanah (c soil).
- Pada tanah berbutir kasar (non kohesif), kekuatan geser disebabkan oleh gesekan antar butir-butir tanah, sehingga sering disebut sudut gesek dalam (ϕ soil)
- Pada tanah yang merupakan campuran antara tanah halus dan tanah kasar (c dan ϕ soil), kekuatan geser disebabkan oleh lekatan (karena kohesi) dan gesekan antara butir-butir tanah (karena ϕ).

Kuat geser dinyatakan dalam rumus :

$$S = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2-1)$$

dimana :

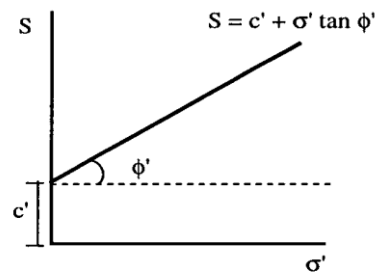
S = Kekuatan tanah

u = Tekanan air pori

σ = Tegangan total

σ' = Tegangan efektif

ϕ' = Sudut geser dalam efektif



2.1.1 Kuat Geser Pasir

Karakteristik kuat geser pasir dapat ditentukan dari hasil uji triaksial dalam kondisi terdrainase maupun hasil pengujian kuat geser langsung. Karakteristik pasir kering dan pasir jenuh adalah sama seperti yang dihasilkan oleh pasir jenuh dengan kelebihan tekanan air pori nol. Pada pasir rapat terdapat keterikatan (interlocking) antar partikel, dan sebelum terjadi keruntuhan geser keterikatan ini harus diatasi untuk menambah friksi. Sudut tahanan geser maksimum (ϕ'_{maks}) yang ditentukan dari tegangan puncak jauh lebih besar dari sudut friksi sesungguhnya (ϕ_u) antara permukaan masing-masing partikel di mana perbedaan tersebut menunjukkan energi yang dibutuhkan untuk mengatasi keterikatan dan menyusun kembali partikel tersebut.

Uji triaksial untuk tanah pasir biasanya berupa contoh tanah tidak asli (*disturbed sample*) Hal ini dikarenakan sulitnya penanganan contoh benda uji untuk tanah pasir. Beberapa pengujian dengan benda uji yang sama dapat dikerjakan dengan penerapan tegangan sel (σ_3) yang berbeda – beda. Nilai sudut gesek dalam puncak (ϕ), dapat ditentukan dari penggambaran lingkaran – lingkaran Mohr hasil dari beberapa pengujian, dengan menggambarkan garis singgung pada lingkaran – lingkaran Mohr yang melalui titik asalnya.

Untuk jenis tanah yang sama, sudut gesek dalam (ϕ) yang ditentukan dari uji triaksial sedikit lebih rendah ($0^\circ - 3^\circ$) daripada yang diperoleh dari pengujian geser langsung. Dalam uji triaksial, pada tegangan sel (tegangan keliling) yang sangat tinggi beberapa butirannya mungkin remuk. Pada kondisi ini gambar grafiknya akan berupa lengkung. Akan tetapi biasanya dalam praktek kondisi tersebut tidak akan pernah terjadi, walaupun kondisi regangan begitu besar. Jika karena beberapa alasan, pengembangan volume pasir padat dicegah pada tegangan

cukup besar, maka akan terjadi pecahan pada butirannya, hasilnya merupakan fenomena geser pada volume konstan. (Hardiyatmo, 1992)

Apabila tahanan geser tanah pasir bertambah, maka akan bertambah pula sudut gesek dalamnya. Hal tersebut karena sifat tanah pasir tersebut yang kasar. Faktor – faktor yang mempengaruhi kuat geser pada tanah pasir antara lain:

1. Ukuran butiran
2. Air yang terdapat di antara butiran
3. Kekasaran permukaan butiran
4. Angka pori atau kerapatan relatif (*relatif density*)
5. Distribusi ukuran butiran
6. Bentuk butiran
7. Tegangan utama tengah
8. Sejarah tegangan yang pernah dialami (*overconsolidated*)

Dari faktor – faktor yang mempengaruhi kuat geser tanah pasir di atas, yang paling besar pengaruhnya adalah nilai angka pori. Hal ini dikarenakan angka pori akan berpengaruh pada kerapatan. Pada uji geser langsung maupun triaksial, apabila angka pori rendah atau kerapatan relatif tinggi, nilai kuat geser (sudut gesek dalam) akan tinggi pula. (Hardiyatmo, 1992)

Apabila dua macam tanah pasir mempunyai kerapatan relatif yang sama, tetapi gradasinya berlainan. Pasir yang bergradasi lebih baik akan mempunyai sudut gesek dalam yang lebih besar. Ukuran butiran untuk pasir dengan angka pori yang sama tidak kelihatan berpengaruh besar pada sudut gesek dalamnya. Jadi, pasir halus dan pasir kasar pada angka pori yang sama akan mungkin mempunyai sudut gesek dalam yang sama. Semakin kasar permukaan butiran, maka sudut gesek dalamnya juga akan semakin besar. (Hardiyatmo, 1992)

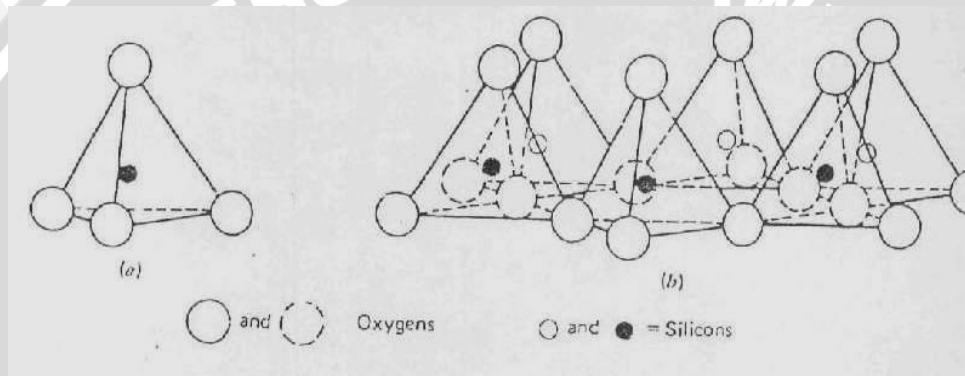
2.1.2 Kuat Geser Tanah Lempung

2.1.2.1 Mineral Lempung

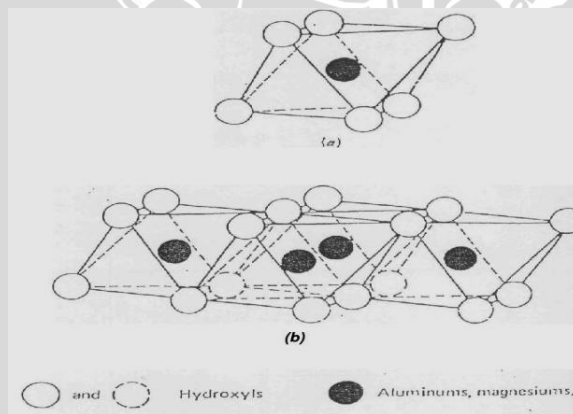
Lempung adalah material berukuran halus yang bersifat plastis bila basah dan keras bila kering dan dibakar. Ukuran butir lempung sangat relatif, namun untuk kesepakatan, ukuran butir $< 0,004$ mm dikategorikan sebagai mineral lempung (Guggenheim dan Martin, 1995). Umumnya, terdapat kira-kira 15

macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung. Diantaranya terdiri dari kelompok-kelompok : montmorillonite, illite, kaolinite, dan polygorskite.

Kebanyakan susunan tanah lempung terdiri dari silika tetrahedra dan aluminium oktahedra. Silika dan aluminium secara parsial dapat digantikan oleh elemen yang lain dalam kesatuannya, keadaan ini dikenal sebagai substitusi isomorf. Kombinasi susunan dari kesatuan dalam bentuk susunan lempeng simbol. Berbagai macam lempung terbentuk oleh kombinasi tumpukan dari susunan lempeng dasarnya dengan bentuk yang berbeda-beda (Harry Christady Hardiyatmo, 1992).



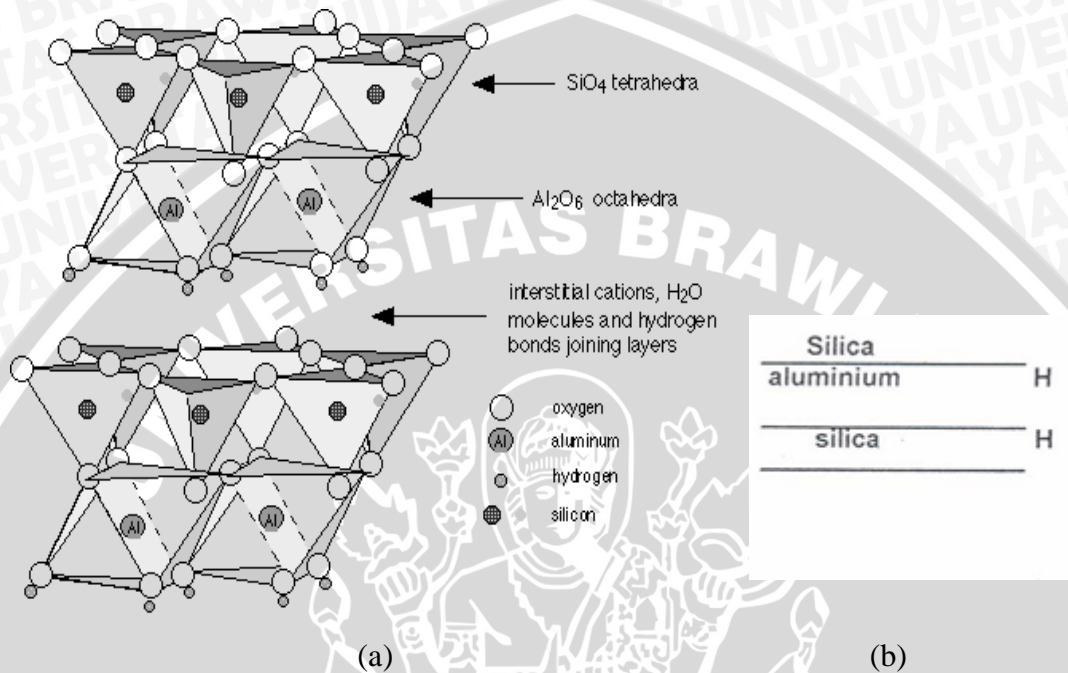
Gambar 2.1 Silika Tetrahedral dan Sheet Silika Tetrahedral



Gambar 2.2 Unit Oktahedral dan Sheet Struktur dari Unit Oktahedral

Kaolinite merupakan mineral dari kelompok kaolin, terdiri dari susunan satu lembar silika tetrahedra dengan satu lembar aluminium oktahedra. Kedua lembaran terikat bersama-sama sedemikian rupa sehingga ujung dari lembaran silika dan satu lapisan lembaran oktahedra membentuk sebuah lapisan tunggal.

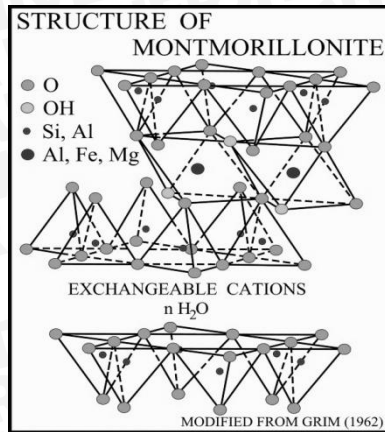
Dalam kombinasi lembaran silika dan aluminium, keduanya terikat oleh ikatan hidrogen. Pada keadaan tertentu, partikel kaolinite mungkin lebih dari seratus tumpukan yang sukar dipisahkan. Karena itu, mineral ini stabil dan air tidak dapat masuk diantara lempengan untuk menghasilkan pengembangan atau penyusutan pada sel satuannya.



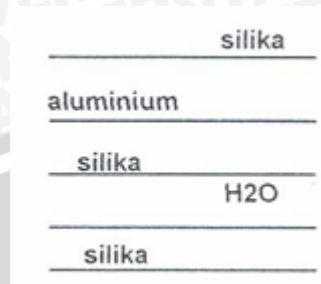
Gambar 2.3 (a) Struktur atom kaolinite

(b) Skematik struktur kaolinite

Montmorillonite disebut juga dengan smectite. Montmorillonite adalah mineral yang dibentuk oleh dua lembaran silika dan satu lembaran aluminium. Lembaran oktahedra terletak diantara dua lembaran silika dengan ujung tetrahedra tercampur dengan hidroksil dari lembaran oktahedra untuk membentuk satu lapisan aluminium oleh magnesium. Karena adanya gaya ikatan Van der Waals yang lemah diantara ujung lembaran silika dan terdapat kekurangan muatan negatif dalam lembaran oktahedra, air dan ion-ion yang berpindah dapat masuk dan memisahkan lapisannya, jadi kristal montmorillonite sangat kecil, tapi pada waktu tertentu mempunyai gaya tarik yang kuat terhadap air. Tanah-tanah yang mengandung montmorillonite sangat mudah mengembang oleh tambahan kadar air. Tekanan pengembangan yang dihasilkan dapat merusak struktur ringan dan perkerasan jalan raya.



(a)

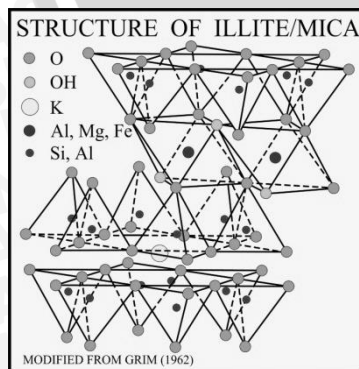


(b)

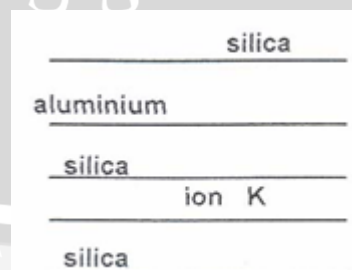
Gambar 2.4 (a) Struktur atom montmorillonite

(b) Skematik struktur montmorillonite

Illite adalah bentuk mineral lempung yang terdiri dari mineral-mineral kelompok illite. Bentuk susunan dasarnya terdiri dari sebuah lembaran aluminium oktahedra yang terikat diantara dua lembaran silika oktahedra. Dalam lembaran oktahedra, terdapat substitusi parsial aluminium oleh magnesium dan besi, dan dalam lembaran tetrahedra terdapat pula substitusi silikon oleh aluminium. Lembaran-lembaran terikat bersama-sama oleh ikatan lemah ion-ion kalsium yang terdapat diantara lembaran-lembarannya. Ikatan-ikatan dengan ion kalsium (K⁺) lebih lemah daripada ikatan hidrogen yang mengikat satuan kristal kaolinite, tapi sangat lebih kuat daripada ikatan ionik yang membentuk kristal montmorillonite. Susunan illite tidak mengembang oleh gerakan air di antara lembaran-lembarannya.



(a)



(b)

Gambar 2.5 (a) Skematik struktur illite

(b) Struktur atom illite

2.1.2.2 Pengaruh air pada tanah lempung

Air biasanya tidak banyak mempengaruhi kelakuan tanah nonkohesif (granuler). Sebagai contoh, kuat geser tanah pasir mendekati sama pada kondisi kering maupun jenuh air. Sebaliknya, tanah berbutir halus khususnya tanah lempung akan banyak dipengaruhi oleh air. Karena pada tanah berbutir halus, luar permukaan spesifik menjadi lebih besar, variasi kadar air akan mempengaruhi plastisitas tanah. Distribusi ukuran butiran tanah umumnya bukan faktor yang mempengaruhi kelakuan tanah butiran halus.

Partikel-partikel lempung mempunyai muatan listrik negatif. Dalam suatu kristal yang ideal, muatan-muatan negatif dan positif seimbang. Akan tetapi, akibat substitusi isomorf yaitu pergantian silika dan aluminium secara parsial oleh elemen yang lain, maka terjadi muatan negatif pada permukaan partikel lempung.

Air yang tertarik secara elektrik, yang berada di sekitar partikel lempung, disebut air lapisan ganda (double layer water). Sifat plastis tanah lempung adalah akibat eksistensi dari lapisan ganda.

Air lapisan ganda pada bagian paling dalam, yang sangat kuat melekat pada partikel lempung, disebut air serapan (adsorbed water). Pertalian hubungan mineral-mineral lempung dengan air serapan, memberikan bentuk dasar dari susunan tanah. Tiap-tiap partikel saling terikat satu sama lain, lewat lapisan air serapan. Maka adanya ion-ion yang berbeda-beda, material organik, beda konsentrasi, dan lain-lainnya akan berpengaruh besar pada sifat tanah. Partikel lempung dapat tolak menolak antara satu dengan yang lain secara elektrik, tapi prosesnya bergantung pada konsentrasi ion, jarak antar partikel, dan faktor-faktor lain.

Jadi jelaslah bahwa ikatan antar partikel tanah yang disusun oleh mineral lempung akan sangat besar dipengaruhi oleh besarnya jaringan muatan negatif pada mineral, tipe, konsentrasi, dan distribusi kation-kation yang berfungsi untuk mengimbangkan muatannya. Schofield dan Samson dalam penyelidikan pada kaolinite, Olphen dalam penyelidikan pada montmorillonite, menemukan bahwa jumlah dan distribusi muatan residu jaringan mineral, bergantung pada PH air. Dalam lingkungan dengan PH yang rendah, ujung partikel kaolinite dapat menjadi bermuatan positif dan selanjutnya dapat menghasilkan gaya tarik ujung ke

permukaan antara partikel yang berdekatan. Gaya tarik ini menimbulkan sifat kohesif (Harry Christady Hardiyatmo, 1992).

2.1.3 Pengujian Kuat Geser Tanah

Pengujian kuat geser dimaksudkan untuk mencari parameter-parameter dari tanah yang diperlukan dalam menentukan kuat geser.

Percobaan kuat geser .

2.1.3.1 Uji tekan bebas (Unconsolidated – Undrained)

Pengujian tekan bebas dilakukan jika sampel tanah berupa tanah kohesif. Benda uji berbentuk silinder dimana tingginya minimal dua kali diameternya. Beban Q_u berangsur-angsur diperbesar sampai tanah mengalami keruntuhan, karena $\sigma_3 = 0$ maka :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_f = \Delta\sigma_f = q_u \quad (2-2)$$

$$q_u = \frac{P}{A} \quad (2-3)$$

$$\text{dan } S_u = C_u = 0,5 q_u \quad (2-4)$$

dimana :

q_u = kuat geser tekan bebas (unconfined compression strength).

$S_u = C_u$ = Kuat geser tak terdrainase

P = Beban

A = Luas sampel

Hubungan konsistensi tanah lempung diperlihatkan dalam tabel 2.1.

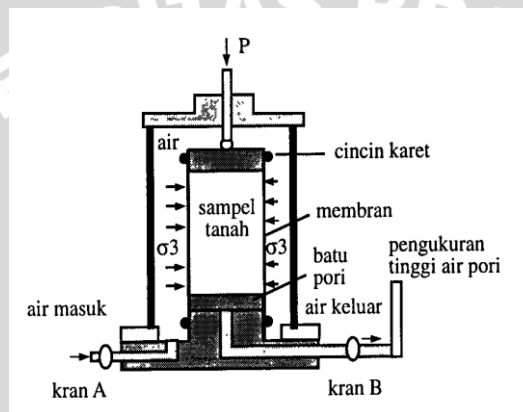
Tabel 2.1 Hubungan Kekuatan Tekan Bebas (q_u) Tanah Lempung dengan Konsistensinya

Konsistensi	q_u (kN/m ²)
Lempung keras	> 400
Lempung sangat kaku	200 – 400
Lempung kaku	100 – 200
Lempung sedang	50 – 100
Lempung lunak	25 – 50
Lempung sangat lunak	< 25

Sumber: Hardiyatmo (2002: 300)

2.1.3.2 Uji triaksial

Pada pengujian ini sampel tanah diletakkan di atas dasar sel dan dibagian atas ditutup. Sampel tanah ditutup dengan membran yang diameternya sama dengan sampel. Sel diisi dengan air dengan tegangan air dinaikkan sampai nilai yang dimaksudkan. Tegangan sel (σ_3) dibiarkan bekerja selama jangka waktu tertentu. Pengukuran kuat geser dilakukan dengan memberi tekanan vertikal pada sampel. Pembacaan dapat dilakukan dengan proving ring pada tegangan tertentu. Dari pembacaan dapat diketahui tekanan maksimum yang terjadi saat terjadi keruntuhan.



Gambar 2.6 Alat pengujian triaksial

Sampel tanah berbentuk silinder dengan tinggi minimal dua kali diameter. Sampel tanah dibungkus dengan karet tipis sehingga air tidak dapat keluar, kemudian dimasukkan kedalam silinder yang diberi air dan tekanan, sehingga air tidak dapat masuk kesegala arah (σ_3). (σ_3) ini disebut tegangan sel dan besarnya konstan. Dari atas sampel tanah ditekan dengan beban P yang berangsur-angsur dinaikkan.

Maka :

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \sigma_3 \quad (2-5)$$

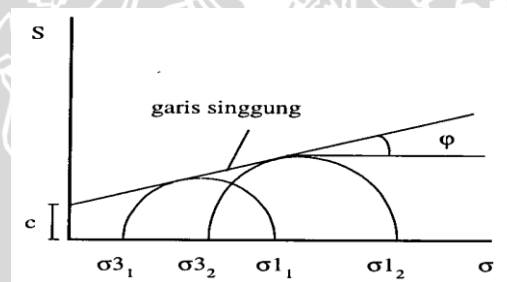
dimana $\frac{P}{A}$ adalah tekanan deviator.

σ_1 dan σ_3 akan memecahkan tanah. Untuk mencari c dan ϕ semu berdasarkan tekanan total dalam hal ini kran A ditutup, sehingga air dalam tanah tidak dapat keluar. (Undrained) beban P baru diberikan setelah σ_3 bekerja,

sehingga tidak memberikan kesempatan pada tanah berkonsolidasi (Unconsolidated).

Untuk tanah lempung dapat dilakukan dengan consolidated undrained dan membaca tekanan air pori. Consolidated artinya σ_3 diberikan tetapi dibiarkan beberapa waktu baru kran B dibuka, dengan demikian σ_3 bekerja sehingga tanah berkonsolidasi sehingga air pada buret naik (konsolidasi selesai). Selanjutnya kran B ditutup dan P dinaikkan. Perubahan tekanan air pori dapat dibaca pada manometer (U). Dengan kombinasi σ_1 , σ_3 , dan U dapat dicari ϕ' dan c' .

Pada pelaksanaan pengujian dilaksanakan minimum tiga kali dari sampel yang berbeda. Dari setiap sampel akan didapatkan σ_1 dan σ_3 . Dari data-data tersebut kemudian digambarkan lingkarannya dan ditarik garis singgung antara lingkaran-lingkaran tersebut. Garis singgung akan memotong sumbu S, maka nilai pada perpotongan tersebut adalah kohesi (c). Nilai ϕ adalah sudut yang dibentuk antara garis singgung dengan sumbu mendatar. Lingkaran Mohr mempunyai diameter $\sigma_3 - \sigma_1$.



Gambar 2.7 Diagram Mohr

Kondisi pengujian triaksial :

1. Unconsolidated Undrained (UU)

Pada pengujian ini sampel tanah tidak dikonsolidasi terlebih dahulu sebelum pembebanan. Selama pengujian kran A selalu ditutup sehingga tidak terjadi drainase. Setelah σ_3 bekerja, σ_1 dapat langsung dikerjakan tanpa harus menunggu sampel terkonsolidasi. Pada konsolidasi ini yang akan diperoleh adalah ϕ dan c , karena pengujian pada tekanan total.

2. Consolidated Undrained (CU)

Sebelum σ_1 diaktifkan sampel tanah harus dikonsolidasikan dulu dengan beban σ_3 dengan cara σ_3 diaktifkan dulu dan diberi waktu supaya air pori

keluar dulu. Setelah konsolidasi benar-benar selesai, barulah beban diaktifkan dengan penambahan beban sampai tanah pecah. Cara ini digunakan untuk pengujian sampel tanah pada umumnya. Pada saat pelaksanaan pengujian besarnya air pori dicatat.

Tekanan efektifnya $\sigma'_3 = \sigma_3 - u$ dan $\sigma'_1 - u$

3. Consolidated Drained (CD)

Tanah dikonsolidasikan dahulu oleh tekanan sel σ_3 kran A dibuka dan ditunggu sampai konsolidasi selesai. Pembebanan dilaksanakan perlahan-lahan dan kran A selalu terbuka sehingga tekan pori nol dan didapatkan σ_3 dan σ'_1 . Nilai yang didapat adalah ϕ' dan c' . Cara ini sesuai untuk pengujian tanah kepasiran dan nilai k tinggi.

2.2 Metode Perbaikan Tanah

Tujuan utama perbaikan tanah adalah untuk meningkatkan daya dukung dan mengurangi penurunan. Perbaikan tanah banyak dilakukan pada tanah lunak, tanah di daerah rawa, tepi sungai, atau pantai yang di atasnya akan didirikan suatu bangunan. Karena pengaruh setiap metode berbeda-beda, maka metode yang digunakan harus sesuai dengan karakteristik lapisan tanah, jenis bangunan, kondisi finansial, dan teknis pelaksanaannya.

Prinsip dasar perbaikan tanah adalah memperbaiki sifat mekanis tanah. Menurut cara yang digunakan, metode perbaikan tanah dibedakan menjadi :

1. Peningkatan kerapatan atau pemadatan tanah dengan cara mengeluarkan air yang terkandung dalam tanah. Yang termasuk dalam metode ini adalah dewatering dan preloading.
2. Peningkatan kuat geser tanah dengan penambahan atau injeksi bahan yaitu stabilisasi dengan bahan kimia, grouting, cerucuk, dan geosintetik.

Peningkatan kuat geser tanah dapat dilakukan dengan perbaikan pengikatan antara butir-butir untuk meningkatkan kohesi. Untuk tanah kohesif, perbaikan karakteristik geseran diadakan dengan meningkatkan kerapatan tanah yang dapat dicapai dengan pengadaan drainase sehingga kohesi tanah meningkat dan kuat gesernya naik.

2.3 Metode Injeksi Elektrokimia

Injeksi elektrokimia merupakan metode dan teknologi perbaikan tanah berbutir halus yang dapat dilakukan di tempat dan berbiaya murah. Kemampuan metode elektrokinetik untuk mengangkut air, dan partikel bebas bermuatan ion melalui tanah berbutir halus telah digunakan sejak ditemukan oleh Reuss pada tahun 1809. Kadar air tanah berbutir halus merupakan karakteristik fisik dasar material yang memiliki dampak besar pada kekuatannya, yaitu mengendalikan air pada tanah berbutir halus seperti lempung. Oleh karena itu sangatlah penting tetapi harus menyajikan masalah yang berulang-ulang dikarenakan sangat rendahnya permeabilitas air pada material.

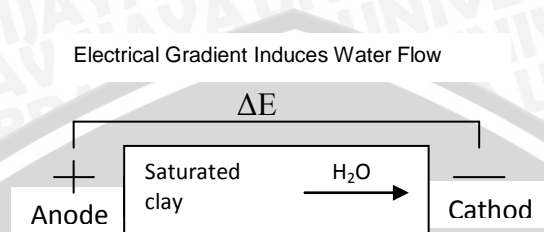
Pada tahun 1939, Cassagrande (1952) menunjukkan bahwa elektrokinetik berlaku untuk tanah berbutir halus dengan kadar air yang tinggi mengakibatkan peningkatan tekanan efektif dalam tanah melalui tekanan air pori. Dia menggunakannya untuk menstabilkan jaringan jalan kereta api pada lereng yang curam. Bagaimanapun penerapan elektrokinetik secara luas masih terhalang oleh berbagai macam masalah teknis.

Perpaduan antara listrik dan aliran hidrolis dapat menyebabkan fenomena elektrokinetik pada material tanah berbutir halus. Ada empat gejala elektrokinetik yang terjadi pada campuran tanah dan air, yaitu:

- *Electroosmosis*, pergerakan air melalui material padat dalam medan listrik
- *Electrophoresis*, pergerakan partikel tersuspensi melalui air dalam medan listrik
- *Streaming Potential*, medan listrik kecil yang disebabkan oleh pergerakan air melalui matriks tanah.
- *Sedimentation or migration potential*, medan listrik kecil yang disebabkan oleh pergerakan (sedimentasi) partikel padat melalui air, atau perpindahan kation dan anion pada medan listrik.

Dari gejala-gejala tersebut, elektroosmosis dan elektroforesis adalah gejala yang paling relevan dengan aplikasi pada Geoteknik dan Teknik Lingkungan. Elektroosmosis umumnya terjadi pada tanah, dan elektroforesis cenderung terjadi pada partikel yang menyatu dan koloid. Batas antara dua proses ini agak gradasional tetapi masih dapat dikaitkan dengan batas Atterberg.

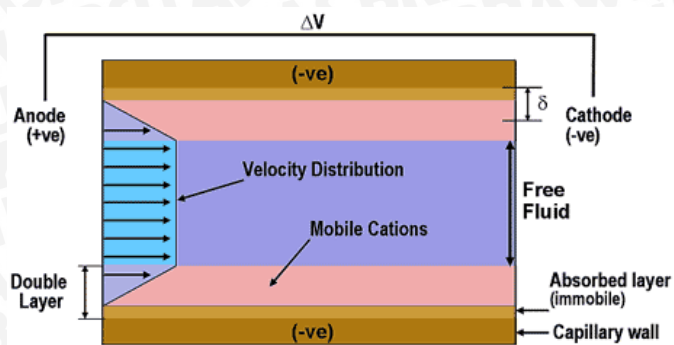
Injeksi elektrokimia adalah metode penyemenan material berbutir halus dengan memanfaatkan fenomena elektroosmosis (salah satu jenis dari fenomena elektrokinetik) yakni aliran zat yang dapat terpolarisasi sebagai akibat beda potensial, atau adanya arus listrik.



Gambar 2.8 Fenomena elektroosmosis.
Sumber: Mitchell (1993: 256).

Metode injeksi elektrokimia memanfaatkan fenomena tersebut untuk mengalirkan cairan perekat (larutan semen atau bahan lain). Kita menggunakan perantara aliran listrik searah untuk mengalirkan partikel-partikel ionik (larutan semen atau bahan lain). Beda tegangan antara dua kutub elektroda menyebabkan timbulnya aliran partikel-partikel yang mana partikel-partikel (larutan semen atau bahan lain) tersebut menggantikan/mengisi ruang-ruang pori kosong yang telah ditinggalkan oleh air pori. Air pori dalam tanah cenderung bergerak mendekati katoda (kutub negatif) karena kandungan kation bebasnya. Melalui proses penyuntikan (larutan semen atau bahan lain) ini diharapkan akan terjadi peningkatan kuat geser tanah yang cukup signifikan akibat timbulnya pengikatan material-material penyusun tanah yang lebih kuat yang dilakukan oleh larutan semen (bahan lain) injeksi.

Teori Helmholtz-Smoluchowski (Helmholtz, 1879; Smoluchowski, 1914) adalah teori paling awal dari elektroosmosis yang sering digunakan, dan analogi kondensator mengambil asumsi bahwa kapiler tanah memerintahkan satu tanda aktif atau yang dekat dengan permukaan dinding (negatif) dan instruksi balasan (positif) terkonsentrasi pada lapisan ganda yang berjarak sedikit menonjol dari dinding, sisa rongga yang kosong diasumsikan diisi dengan cairan pori bebas, seperti pada gambar 2.9



Gambar 2.9 Model Helmholtz-Smoluchowski untuk Aliran Elektroosmosis (Mitchel, 1993)

Teori Helmholtz-Smoluchowski menyatakan bahwa jika material berpori atau tanah yang basah dikenai arus listrik atau terdapat beda potensial listrik, maka kation akan tertarik ke katoda dan anion ke arah anoda. Ketika ion bergerak, mereka membawa air hidrasi dan mendesak penghambat cairan di sekitarnya. Karena jumlah kation lebih banyak dari anion dalam tanah yang terdapat pada partikel lempung, maka terjadi aliran air menuju katoda.

Laju aliran air dikendalikan oleh keseimbangan antara gaya listrik yang menyebabkan pergerakan air di satu arah dan gesekan antara cairan dan dinding yang lain. Aliran keseluruhan (q_A) yang dihasilkan oleh aplikasi dari beda potensial (D) dapat dinyatakan sebagai berikut (Mitchell, 1993):

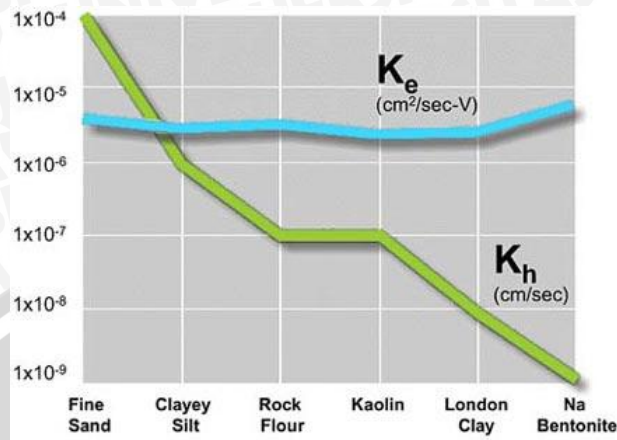
$$q_A = k_e \frac{V}{L} A \tag{2-6}$$

Dimana k_e adalah elektroosmosis permeabilitas tanah; V/L adalah gradient potensial listrik; dan A adalah luas penampang sampel tanah dimana perbedaan potensial diterapkan. Dengan demikian berlaku Hukum Darcy tentang aliran hidrolis. Dimana Q adalah laju aliran, k_h adalah permeabilitas hidrolis, i_h adalah gradien hidrolis, dan A adalah luas penampang tanah.

$$Q = k_h i_h A \tag{2-7}$$

Salah satu parameter dari elektroosmosis adalah k_e merupakan sifat tanah yang menggambarkan kecepatan aliran air akibat beda potensial listrik. Harga k_e tidak tergantung pada ukuran pori dan memiliki nilai yang relatif konstan dalam

tanah. Hal ini sangat kontras dengan permeabilitas hidrolis (k_h) yang menurun tajam dengan ukuran pori seperti pada gambar 2.10



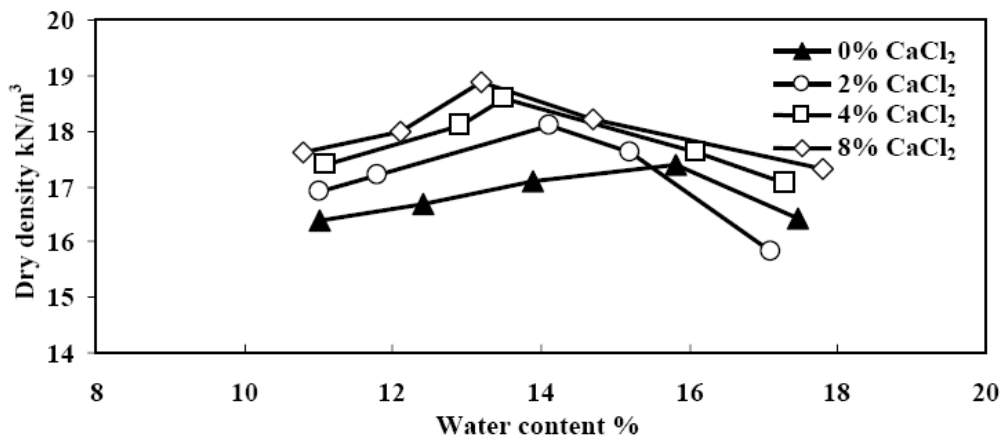
Gambar 2.10 Kinerja Elektroosmosis tentang Rentang Tanah (Mitchel, 1993)

Ini berarti bahwa tanah yang lebih halus dan lebih kedap air, kegunaan relatif aliran elektroosmosis semakin meningkat. Hasil akhirnya adalah elektroosmosis dapat menyebabkan aliran air yang signifikan pada material dalam keadaan normal meskipun kedap air.

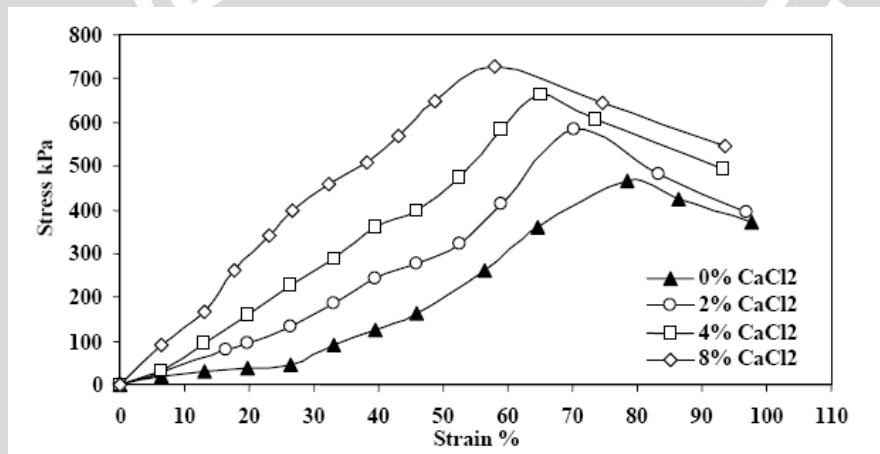
2.4 Larutan CaCl_2

Calcium Chloride (CaCl_2) merupakan garam anorganik yang bisa dipakai untuk menstabilkan tanah sehingga tanah yang jelek bisa dipakai. Calcium Chloride dapat mengikat dan menyerap uap air di atmosfer sehingga dengan terserapnya air pada tanah maka kandungan air pada tanah akan berkurang sehingga tanah menjadi lebih keras. Pada suhu 25°C dan kelembaban 90%, 1 kg CaCl_2 dapat menerima lebih dari 4 kg air. Selain itu CaCl_2 sangat mudah larut dimana 59,5 gr CaCl_2 dapat larut dalam 100 ml air pada suhu 0°C atau pada suhu yang lebih tinggi.

Pada gambar 2.11 dapat dilihat perbedaan compaction test antar tanah dengan CaCl_2 dan tanpa CaCl_2



Gambar 2.11 Hubungan antara water content, prosentase CaCl₂ dan dry density. (Abood, 2007)



Gambar 2.12 Hasil Unconfined Compression Test Menggunakan CaCl₂ dengan Beberapa Prosentase. (Abood, 2007)

Pada gambar 2.12 nampak bahwa penambahan CaCl₂ akan mengurangi kadar air tanah dan dapat meningkatkan dry density pada tanah. Hal tersebut dikarenakan adanya flokulasi garam pada tanah.

2.5 Penelitian Terdahulu

Timbunan tanah dan lereng yang tidak stabil merupakan masalah utama yang sering dihadapi oleh jawatan pengelola kereta api dan jalan. Dari banyak kasus ketidakstabilan, disebabkan secara langsung oleh drainase yang jelek selama konstruksi. Di beberapa negara seperti Jerman, Ceko, dan Inggris jawatan kereta api sering menghadapi permasalahan ini pada jaringan jalan mereka.

Permasalahan ini diperkirakan akan meningkat di masa mendatang sebagai akibat perubahan iklim, sehingga diperlukan metode perbaikan yang murah dan mudah. Perbaikan tanah dengan metode elektrokimia (*dewatering* dan *grouting elektrokimia*) merupakan inovasi baru untuk menyelesaikan permasalahan yang endemik tersebut dengan cepat dan tanpa mengganggu operasi kereta (Draganov, 1988).



Gambar 2.13 Pemasangan Elektroda Elektrokinetik Pada Kereta Api Tanggul

Perbaikan tanah dengan metode injeksi elektrokimia juga dilakukan untuk perkuatan tanah di bawah pondasi bangunan yang mengalami keruntuhan akibat dimakan usia atau permasalahan lingkungan seperti penurunan muka air tanah. Seperti halnya perbaikan timbunan tanah, aplikasi metode ini dilakukan dengan menginjeksikan larutan yang berfungsi sebagai semen dan mengisi air pori yang hilang. Setelah pelaksanaan stabilisasi tanah dengan metode elektrokimia sisa lubang bor diisi dengan larutan semen biasa. Penelitian ini dilakukan oleh Azzam (1997) di Jerman yaitu pemadatan tanah berpasir pada pondasi gereja St. Nikolaus di Walbeck-Geldern secara elektrokimia. Sebelum penerapan di lapangan, dilakukan percobaan pemadatan tanah secara elektrokimia oleh Azzam di laboratorium dan di lapangan.

Percobaan di laboratorium, sampel tanah yang diambil akan diperiksa di laboratorium kimia dengan menggunakan alat uji khusus untuk mendapatkan pemadatan di zone anoda, katoda serta daerah peralihannya dengan menggunakan bahan kimia tertentu dalam kondisi tertentu. Untuk mendapatkan evolusi reaksi

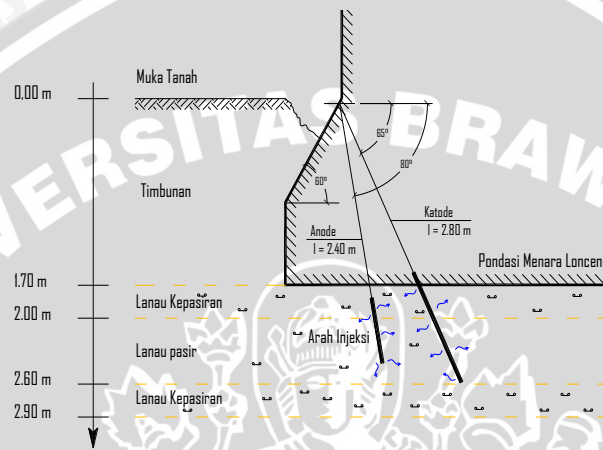
yang optimal serta daya hantar listrik yang dibutuhkan, pasir halus yang bermasalah tadi dibasahi dengan larutan elektrolit. Di laboratorium telah diselidiki cara untuk memadatkan tanah dengan menggunakan pengendapan karbonat. Sampel tanah yang telah diambil diletakkan dalam dua reservoir, kemudian dilanjutkan dengan injeksi bahan kimia baik di anoda maupun katoda. Tegangan yang dipasang besarnya 1 volt/cm. Digunakan susunan elektroda katoda-anoda, elektroda besi bertegangan 1 volt/cm ditancapkan.

Percobaan di lapangan, dilakukan rehabilitasi tanah secara elektrokimia dengan menggunakan probe DPL agar hasil injeksi bisa diketahui. Dengan menggunakan probe khusus, pada titik-titik injeksi yang telah ditetapkan diisi dengan pipa PVC sedalam 1,7 m untuk mengisolir elektroda di daerah pengisian dari bidang tanah dan untuk menghindari material-material tanah runtuh pada saat fase instalasi. Untuk menetapkan posisi pertama pada daerah yang akan dipadatkan, dilakukan pemeriksaan dengan menggunakan probe (1,7 m hingga 2,7 m di bawah batas atas tanah). Selanjutnya, pada meter bagian dalam dibenamkan batang injeksi hingga 2,7 m di bawah tepi atas tanah. Interval elektroda yang bersesuaian adalah 1 m. Tegangan yang digunakan adalah 80 V, yang berarti 0,8 V/cm.

Penerapan di lapangan, dipilih metode pemadatan dengan menggunakan karbonat berdasarkan percobaan pendahuluan. Rehabilitasi pemadatan tanah pada pondasi gereja St. Nikolaus harus dilakukan dengan dua seri injeksi dalam daerah pondasi menara genta. Injeksi pertama dengan menginjeksikan karbonat yang terdiri dari elektroda-elektroda yang ditanam secara miring di depan pondasi gereja dan injeksi kedua ditanam langsung di bawah pondasi gereja, sehingga diperlukan sejumlah lubang besar pengeboran pada pondasi. Setelah pelaksanaan pemadatan tanah secara elektrokimia, lubang-lubang pengeboran dari seri injeksi yang kedua ditekan dengan bahan pengikat yang halus. Dengan demikian pada saat yang sama ruang-ruang yang terdapat diantara pondasi dan bangunan dasar serta di daerah pondasi terisi dengan bahan pengikat.

Hasil percobaan di laboratorium, didapatkan banyak terjadi pemadatan di daerah katoda. Di daerah anoda tidak mengalami pemadatan, namun reaksi besi yang telah diuraikan dapat teramati. Setelah pemutusan tegangan serta

pengeringan sampel tanah, pemadatan masih tetap berlanjut. Hasil penerapan di lapangan, setelah tindakan rehabilitasi tanah secara elektrokimia menunjukkan bahwa pemadatan tanah telah tercapai. Namun kuat geser tanahnya belum memperlihatkan hasil sebagaimana yang telah diharapkan di bawah pondasi gereja St. Nikolaus. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan metode injeksi elektrokimia untuk menentukan kuat geser tanahnya.



Gambar 2.14 Skema perbaikan tanah di bawah pondasi bangunan dengan metode injeksi elektrokimia dan distribusi penempatan elektroda

(Azzam, 1997)

Di Indonesia kasus keruntuhan timbunan tanah baik untuk keperluan jalan kereta api maupun tanggul atau bendungan juga sering dijumpai. Contoh kasus terakhir adalah keruntuhan timbunan tanah Situ Gintung di Tangerang setahun yang lalu. Ada juga kejadian runtuhnya timbunan untuk jalan kereta api yang terjadi di jalur selatan Jawa Barat (Kompas, 26 Februari 2009). Permasalahan penurunan pondasi akibat perubahan muka air dan konsolidasi tanah di Indonesia juga telah dijumpai di kota besar, seperti di Jakarta (Kompas, 5 Maret 2009).

BAB III

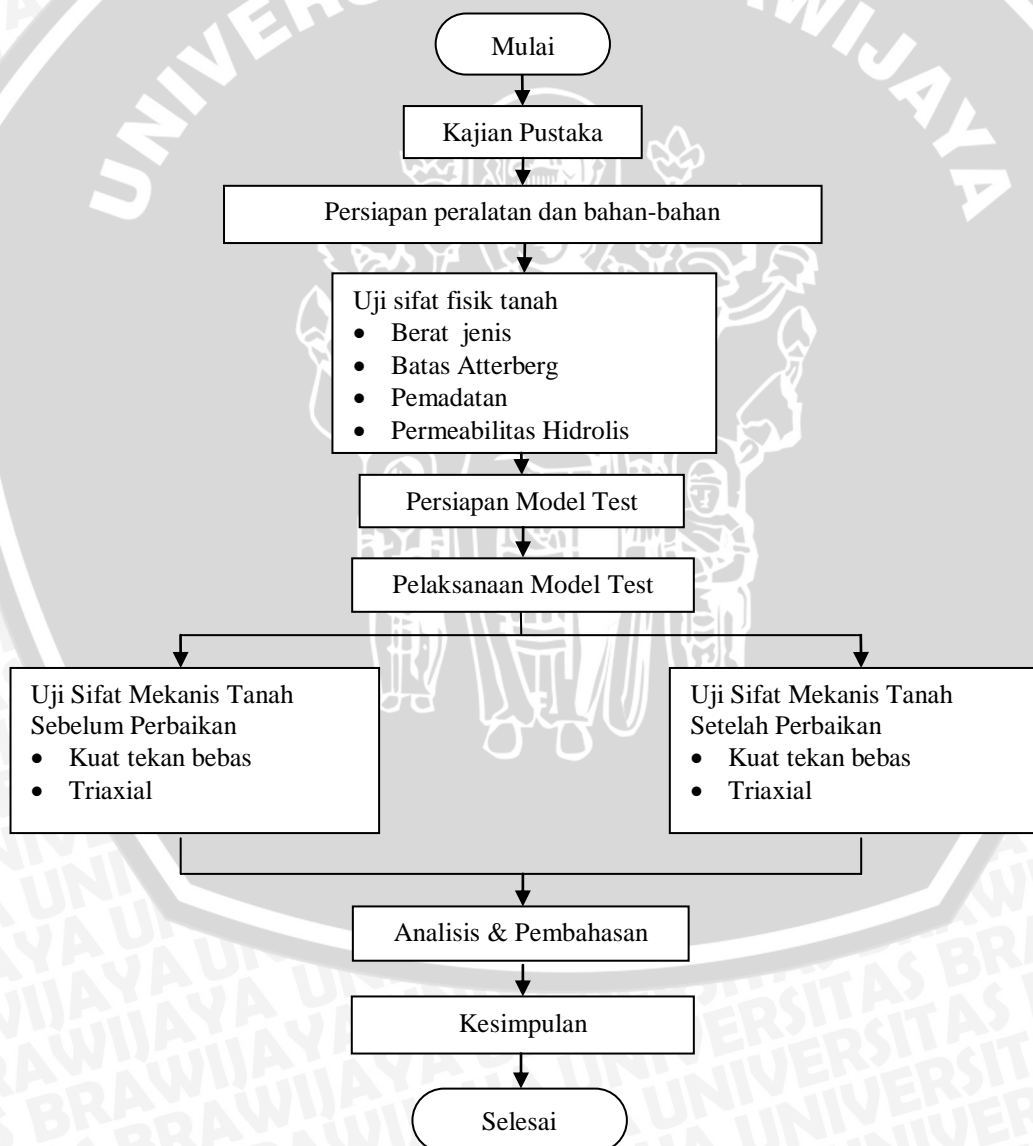
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu Dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan November 2009 sampai dengan Maret 2010 di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

3.2 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disajikan pada gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1 Tahapan Penelitian

3.3 Peralatan Dan Bahan Penelitian

Pada penelitian ini peralatan yang digunakan yaitu :

- Bak fiberglass ukuran 50 cm x 50 cm x 30 cm.
 - Gelas ukur larutan 1000 cc.
 - Keran (dapat digerakkan $\frac{1}{2}$ putaran).
 - Selang.
 - Meja buat tempat bak fiberglass (tinggi = 50 cm).
 - Meja buat tempat gelas ukur (tinggi = 70 cm).
 - Elektroda pipa tembaga (panjang = 20 cm, diameter = 1 cm) terdiri dari 1 anoda dan 6 katoda.
 - Kertas saring.
 - Kabel + penjepit buaya.
 - Adaptor beserta rangkaiannya berfungsi untuk merubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC). Adaptor yang dibuat dapat menghasilkan beda tegangan sampai 40 V dan arus listrik 10 A.
 - Travo sebagai komponen utama adaptor mempunyai berat total 40 kg.
 - Avometer.
 - Regulator berfungsi untuk penstabil arus dan tegangan yang diperoleh dari jaringan listrik dan PLN.
- Bahan yang digunakan yaitu :
- lempung kaolinit
 - pasir
 - larutan kimia CaCl_2 konsentrasi 10%
 - Air penyulingan untuk pembuatan larutan CaCl_2

3.4 Metode Penelitian

3.4.1 Uji Dasar

Sebelum dilakukan percobaan, terlebih dahulu dilakukan uji dasar untuk mengetahui karakteristik tanah itu sendiri. Standar pengujian untuk tanah campuran lempung pasir dengan perbandingan 70% kaolin dan 30 % pasir disajikan dalam tabel 3.1

Tabel 3.1: Metode Pengujian Sifat Fisik dan Mekanis Tanah

No	Jenis Pengujian	Kode SNI
1	Kadar air tanah	03-1965-1990
2	Berat jenis tanah	03-1964-1990
3	Batas cair dengan alat Cassagrande	03-1967-1990
4	Batas plastis	03-1966-1990
5	Kepadatan tanah maks. dengan kadar air optimum	03-2832-1992
6	Kuat tekan bebas tanah kohesif	03-3638-1994
7	Uji triaxial tanah kohesif dalam keadaan tanpa konsolidasi dan drainase	03-4813-1998

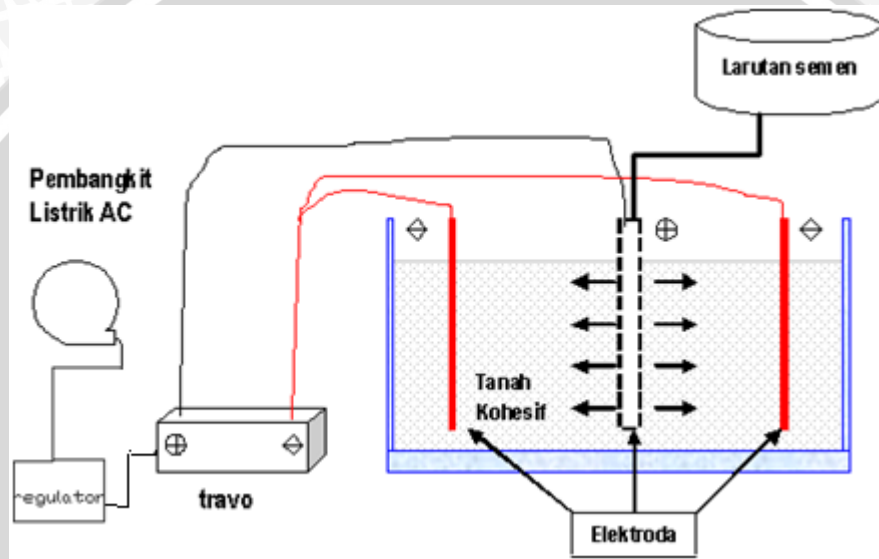
3.4.2 Model test

Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah model test injeksi elektrokimia di laboratorium untuk perbaikan tanah.

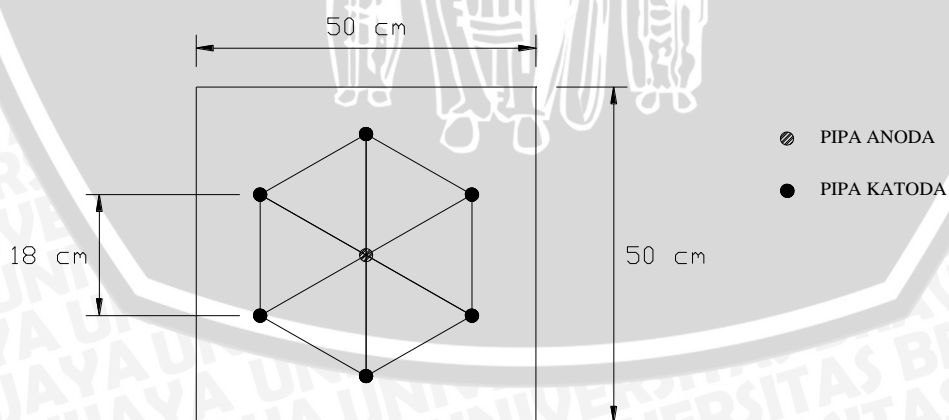
Langkah-langkah percobaan pada model test yaitu:

1. Mempersiapkan tanah dalam keadaan kadar air optimum.
2. Membagi tanah menjadi 6 bagian.
3. Memasukkan per bagian tanah ke dalam bak kemudian diratakan dengan *rolling pin*.
4. Memasang pipa tembaga membentuk segi enam sama sisi dan mengatur jarak antar pipa sepanjang 18 cm.
5. Menghubungkan pipa tembaga dengan pembangkit arus AC dan trafo dengan kabel.
6. Memasang selang untuk larutan pada pipa tembaga yang berfungsi sebagai anoda.
7. Menyalakan pembangkit arus AC dengan beda tegangan 18 V.
8. Memasukkan larutan ke dalam pipa tembaga yang berfungsi sebagai anoda.
9. Melakukan pengamatan terhadap model test dengan mengamati jumlah larutan yang masuk ke dalam pipa anoda setiap 1 jam, besar beda potensial antara anoda dan katoda setiap 1 jam serta arus listrik pada pipa katoda setiap 1 jam.

10. Mengambil sampel larutan pada katoda apabila pada katoda sudah terdapat larutan. Pengambilan menggunakan pipet dan dilakukan setiap 1 jam serta dicatat volumenya.
11. Pengamatan dilakukan hingga larutan injeksi telah sampai pada pipa katoda atau maksimal hingga 168 jam.
12. Melakukan pengambilan sampel sebanyak 6 sampel tanah.
13. Melakukan uji triaxial pada 4 sampel tanah serta uji unconfined pada 2 sampel tanah.



Gambar 3.2 Model Tes Injeksi Elektrokimia di Laboratorium dengan Skala Percobaan (Tampak Samping)



Gambar 3.3 Model Tes Injeksi Elektrokimia Di Laboratorium Dengan Skala Percobaan (Tampak Atas)

3.5 Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis bahan pengikat atau larutan semen yaitu larutan CaCl_2 konsentrasi 10% dan voltase yang digunakan yaitu 1,5 Volt. Sedangkan variabel terikatnya adalah kuat geser tanah, baik dengan metode triaxial maupun kuat tekan bebas.

3.6 Metode Analisis Data

Pengolahan data karakteristik tanah didasarkan pada standar ASTM yang telah ditetapkan di atas dan analisis data electro-chemical injection dikaji berdasarkan pada teori-teori yang mendukung. Untuk membantu perhitungan dan penggambaran grafik digunakan software Microsoft Excel.

3.6.1 Perhitungan Uji Triaxial

Langkah-langkah analisis dalam perhitungan pengolahan data dari uji triaxial adalah sebagai berikut:

- Menghitung axial strain (ε) untuk setiap perubahan beban axial

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3-1)$$

- Menghitung luas penampang mula-mula dari specimen (A_0)

$$A_0 = (0,25 \times \pi \times D^2) \quad (3-2)$$

- Menghitung luas terkoreksi penampang dari specimen (A) untuk setiap penambahan beban axial

$$A = A_0 \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (3-3)$$

- Perhitungan beban

Beban = Pembacaan proving ring x kalibrasi

- Menghitung tegangan deviator ($\sigma_1 - \sigma_3$)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A'} \quad (3-4)$$

- Menghitung tegangan utama mayor (σ_1)

$$\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3 \quad (3-5)$$

g. Menggambar grafik stress-strain

Grafik stress-strain menunjukkan hubungan antara tegangan deviator sebagai ordinat dan axial strain sebagai absis.

h. Menghitung tegangan utama mayor dan tegangan utama minor pada saat keruntuhan

Buat lingkaran mohr pada saat keruntuhan dengan tegangan geser sebagai ordinat dan tegangan normal sebagai absis dengan cara sebagai berikut :

- Titik pusat lingkaran diletakkan pada absis $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ dan jari-jari = $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$
- Jika lebih dari 1 specimen yang dites dengan chamber pressure yang berbeda, lingkaran mohr diplot sehingga menunjukkan unconsolidated undrained strength dari tiap-tiap specimen dalam grafik yang sama.
- Gambar garis singgung melalui lingkaran-lingkaran mohr tersebut untuk menentukan strength envelope. Garis singgung ini diteruskan memotong sumbu tegangan geser yang menyatakan besar kohesi (c) dan sudut kemiringan garis singgung dengan sumbu mendatar menyatakan sudut perlawanan atau sudut gesek dalam (ϕ).

3.6.2 Perhitungan Uji Kuat Tekan Bebas

Langkah-langkah analisis dalam perhitungan pengolahan data dari uji kuat tekan bebas adalah sebagai berikut :

a. Menghitung nilai regangan

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Dimana : ε = Regangan

ΔL = Perubahan panjang

L_0 = Panjang mula-mula

b. Perhitungan beban

Beban = Pembacaan arloji x kalibrasi

- c. Menghitung luas penampang benda uji

$$A' = \frac{A_0}{1 - \varepsilon}$$

Dimana : A' = luas terkoreksi

A_0 = luas mula-mula

ε = regangan

- d. Menghitung tegangan normal

$$\sigma = \frac{P}{A'}$$

Dimana : σ = tegangan

P = beban

A' = luas terkoreksi

- e. Menggambar diagram Mohr untuk tanah undisturbed untuk menghitung nilai q_u dan c_u .

Nilai q_u diambil dari nilai tegangan pada tabel 3.3 yang paling besar nilainya.

Sedangkan nilai c_u dihitung berdasarkan rumus:

$$c_u = 0.5 \times q_u \quad (3-6)$$

dimana q_u = kuat geser tekan bebas

c_u = kuat geser undrained dari tanah

- f. Menggambar diagram tegangan dan regangan untuk tanah undisturbed.

3.7 Metode Pengambilan Data

Dalam penelitian ini pengujian kuat geser tanah dilakukan dengan uji triaksial dan kuat tekan bebas. Sebelum perbaikan tanah dilakukan setelah uji sifat fisik sampel tanah. sedangkan pengujian kuat geser tanah setelah perbaikan tanah dengan metode injeksi elektrokimia tersebut dilakukan setelah mencapai 168 jam dan melalui proses dewatering. Pengambilan sampel tanah dapat dilihat pada gambar 3.3, tabel perhitungan triaksial pada tabel 3.2, kuat tekan bebas pada tabel 3.3, dan pengamatan model tes pada tabel 3.4 di bawah ini:

Tabel 3.2: Uji Triaxial

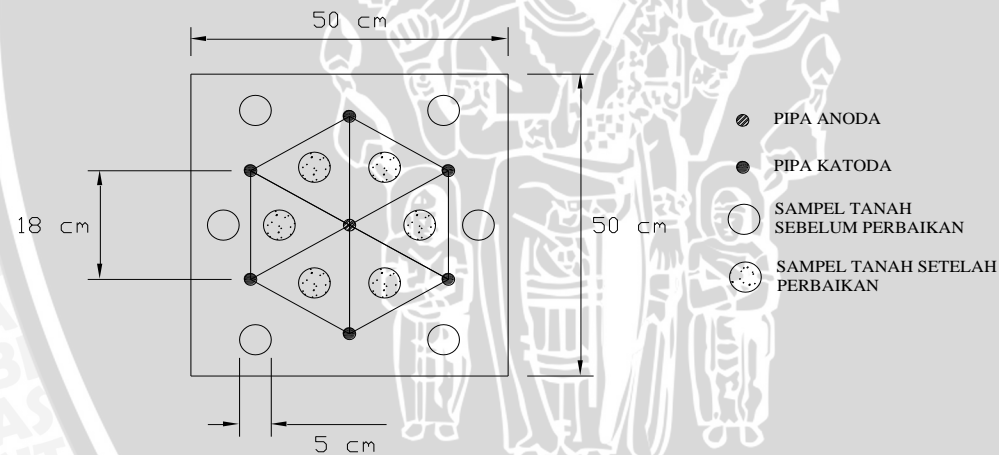
Waktu	ΔH	ϵ	$1 - \epsilon$	Luas Awal A_0	Luas Terkoreksi A'	Proving Ring	Beban (P)	$P/A' = \sigma_1 - \sigma_3$	σ_1	σ_3
menit	mm	%		cm ²	cm ²	strip	kg	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²

Tabel 3.3: Uji Kuat Tekan Bebas

Waktu	Regangan		Beban		Luas (cm ²)			Tegangan (Kg/cm ²)
	Pmbacaan arloji	Regangan $\epsilon(\%)$	Pmbacaan arloji	Beban (Kg)	A_0	Angka koreksi $1/(1-\epsilon)$	Luas terkoreksi $A'=A_0$ $(1/(1-\epsilon))$	

Tabel 3.4 : Pengamatan Model Test

Tgl	Waktu	Tegangan (V)	Kuat arus (I)	Volume larutan yang mengalir (ml)	Volume larutan yang diambil pada katoda (ml)						Hambatan (R)	Keterangan	
					1	2	3	4	5	6			



Gambar 3.4 Pengambilan sampel tanah untuk uji kuat geser tanah

3.8 Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan dapat dilihat pada tabel 3.5 di bawah ini:

Tabel 3.5 Rancangan percobaan

LARUTAN CaCl ₂ 10%						
Pengujian	Sebelum Injeksi (OMC)			Setelah Injeksi		
	Parameter Kekuatan Tanah			Parameter Kekuatan Tanah		
Unconfined Test	c	q _u	Kuat Geser	c	q _u	Kuat Geser

LARUTAN CaCl ₂ 10%									
Pengujian	Sebelum Injeksi (OMC)			Sebelum Injeksi (Jenuh)			Setelah Injeksi		
	Parameter Kekuatan Tanah			Parameter Kekuatan Tanah			Parameter Kekuatan Tanah		
Triaxial Test	c	Φ	Kuat Geser	c	Φ	Kuat Geser	c	Φ	Kuat Geser

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Penelitian

Pada percobaan ini jenis tanah yang digunakan adalah campuran tanah lempung jenis kaolin dan pasir. Presentase campuran tanah yaitu 70% kaolin, 20% pasir sedang dan 10% pasir halus. Penggunaan campuran tanah kaolin dan pasir adalah untuk mempermudah saat pengambilan dan pengujian sampel kuat geser yaitu dalam kondisi OMC, jenuh, dan setelah injeksi elektrokimia.

Pengambilan data yang dilakukan tiap 1 jam selama 240 jam adalah beda tegangan, kuat arus, dan jumlah larutan yang masuk ke dalam tanah melalui anoda. Sedangkan data yang diambil tiap 2 jam selama 240 jam adalah jumlah air yang keluar dari tanah melalui katoda. Pada bab ini pembahas akan mengkaji karakteristik tanah dan kuat geser tanah sebelum dan setelah mengalami injeksi elektrokimia sebagai hasil uji coba di laboratorium.

4.2 Hasil Uji Sifat Dasar Tanah

4.2.1 Berat Jenis Tanah

Berat jenis tanah adalah perbandingan antara berat butir tanah dan berat air suling dengan isi yang sama pada suhu tertentu. Nilai – nilai berat jenis dari berbagai jenis tanah ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Berat Jenis Tanah (Sumber: Craig)

Macam Tanah	Berat Jenis
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau Anorganik	2,62 – 2,68
Lempung Organik	2,58 – 2,62
Lempung Anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Dari hasil penelitian, didapatkan nilai rata-rata berat jenis butiran tanah (Gs) sebesar $2,625 \text{ gr/cm}^3$. Maka berdasarkan tabel di atas jenis tanah tersebut termasuk ke dalam jenis tanah lanau anorganik.

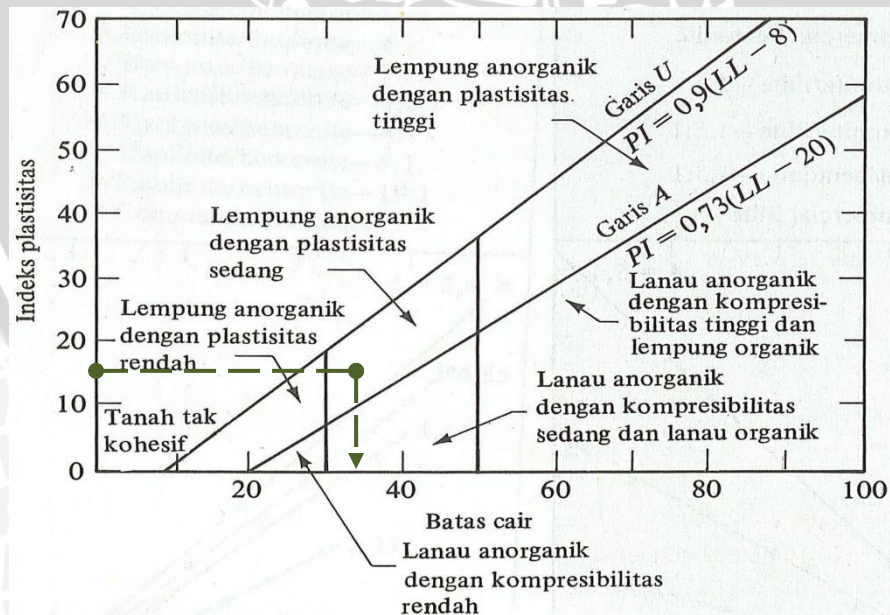
4.2.2 Batas Atterberg

Tujuan pemeriksaan ini adalah untuk mengetahui klasifikasi tanah yang akan digunakan sebagai benda uji penelitian. Dari hasil pengujian batas Atterberg diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 4.2 Hasil Pemeriksaan Batas Atterberg

Batas Cair (LL) (%)	Batas Plastis (PL) (%)	Indeks Plastisitas (IP)
35,29	15,54	19,76

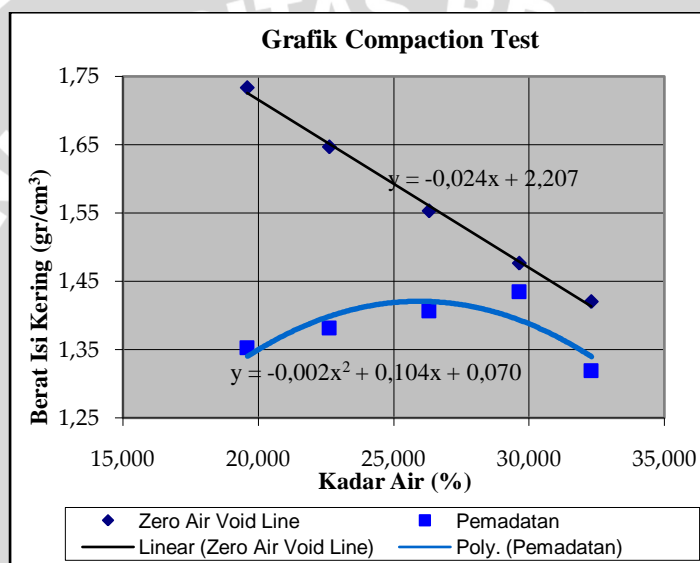
Dengan hasil pemeriksaan batas cair dan batas plastis tersebut, maka berdasarkan sistem Klasifikasi Tanah Unified, tanah campuran kaolinite 70% dan pasir 30% diklasifikasikan sebagai CL (lempung berpasir dengan plastisitas sedang).



Gambar 4.1 Plotting Hasil Uji Batas Atterberg pada Diagram Klasifikasi Tanah Kohesif

4.2.3 Pematatan

Uji pematatan ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kadar air optimum (OMC) tanah dan berat isi kering maksimum yang selanjutnya digunakan untuk menentukan kadar air yang dipakai untuk pembuatan benda uji. Dalam penelitian ini, uji kepadatan diperlukan untuk menentukan kadar air pembasahan tanah campuran kaolinit dan pasir sebelum dilakukan injeksi elektrokimia. Dari percobaan pematatan diperoleh hasil yang nilainya diplotkan ke dalam grafik hubungan berat isi kering tanah terhadap kadar air, seperti pada gambar 4.2 di bawah ini:



Gambar 4.2 Grafik Hubungan Berat Isi Kering (γ_d) dan Kadar Air

Dari grafik di atas di dapatkan nilai kadar air optimum untuk mencapai kepadatan maksimum yaitu sebesar 26 %, sedangkan berat isi kering maksimum yaitu 1,4220 gr/cm³.

4.2.4 Permeabilitas Hidrolis

Koefisien permeabilitas hidrolis (K_h) merupakan suatu nilai yang menunjukkan indikasi kemampuan tanah dalam melewatkan air melalui pori-pori tanah. Pada penelitian ini digunakan alat uji falling head karena lebih akurat untuk tanah berbutir halus. Dengan mengetahui ketinggian air keadaan awal pengujian (h_1) pada saat waktu $t_1 = 0$, penurunan muka air (h_2) pada saat waktu tertentu (t_2), luas potongan melintang benda uji (A), luas pipa pengukur (a), dan panjang benda uji (L) maka permeabilitas hidrolis dapat dihitung sebagai berikut:

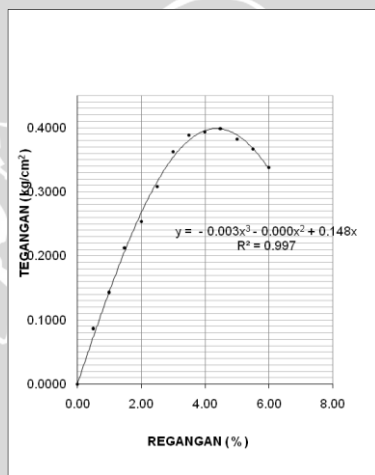
$$q = k_h \cdot i \cdot A = k_h \frac{h}{L} A \tag{4-1}$$

Hasil perhitungan koefisien permeabilitas hidrolis menunjukkan nilai k_h rata-rata sebesar 6,08916E-08.

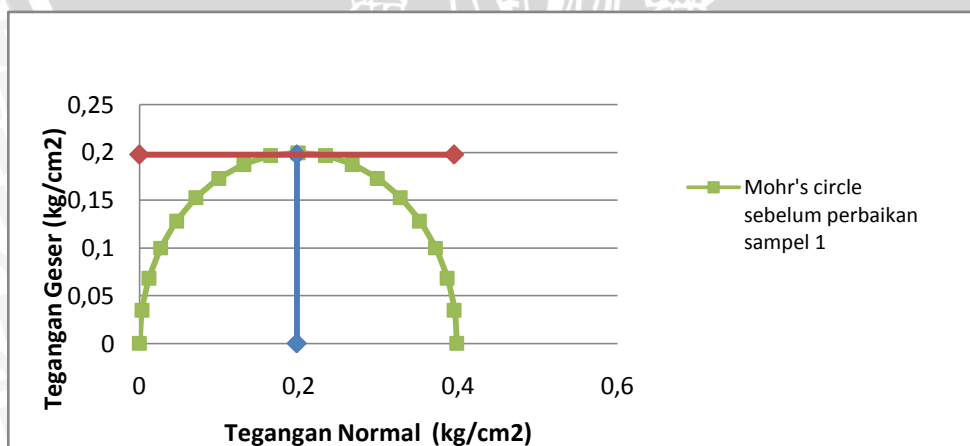
4.3 Hasil Uji Sifat Mekanis Tanah

4.3.1 Unconfined

Uji kuat tekan bebas dilakukan pada tanah lempung yang belum mendapatkan perlakuan. Injeksi juga dilakukan untuk mengetahui kekuatan sebelum perlakuan injeksi elektrokimia. Dari percobaan kuat tekan bebas diperoleh gambar hubungan tegangan regangan dan diagram Mohr sebagai berikut:



Gambar 4.3 Grafik Hubungan Tegangan Regangan Unconfined

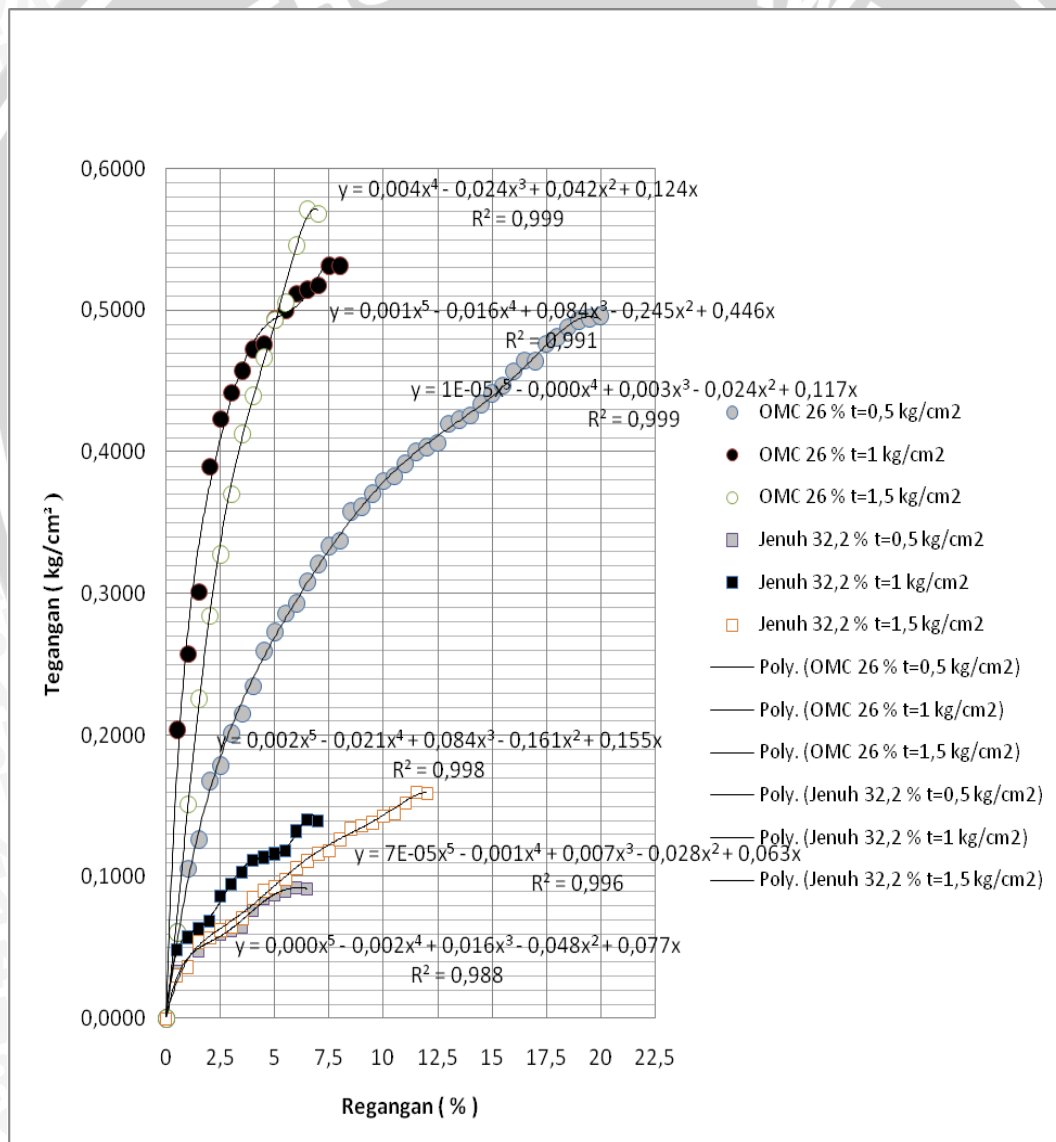


Gambar 4.4 Diagram Mohr Unconfined

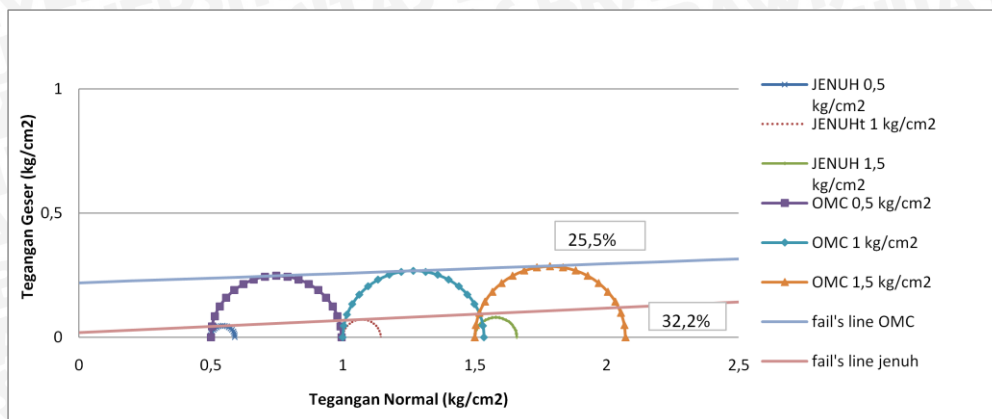
Dari gambar grafik dan diagram Mohr unconfined didapatkan kuat geser sebesar $0,115 \text{ kg/cm}^2$ atau $11,5 \text{ kN/m}^2$. Berdasarkan hubungan kekuatan tekan bebas (q_u) tanah lempung dengan konsistensinya, tanah campuran kaolinite 70% dan pasir 30% termasuk ke dalam tanah lempung sangat lunak.

4.3.2 Triaksial dalam Keadaan OMC dan Jenuh

Uji triaksial ini dilakukan untuk mengetahui sudut geser dan kuat geser tanah dalam kondisi OMC dan jenuh yang nantinya akan dibandingkan dengan uji triaksial setelah mengalami injeksi elektrokimia. Dari percobaan grafik hubungan tegangan regangan dan diagram Mohr seperti gambar 4.5 berikut ini:



(a)



(b)

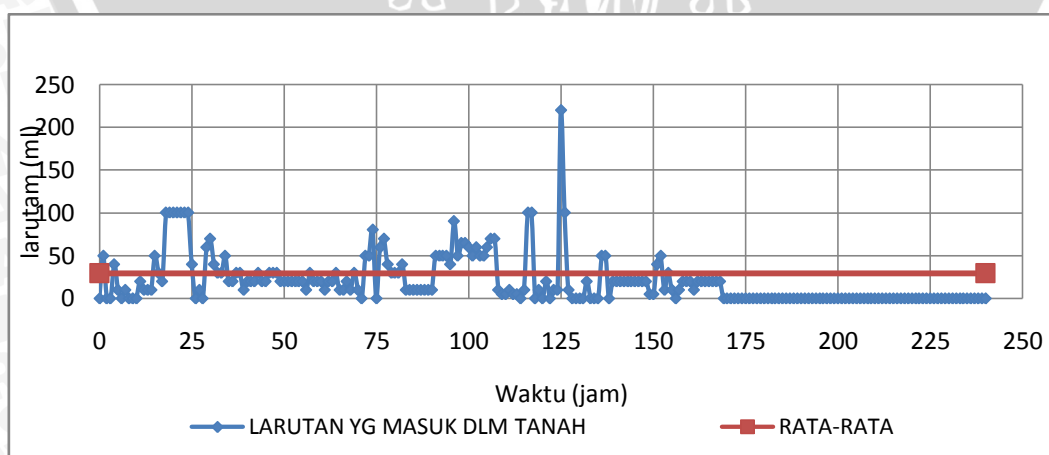
Gambar 4.5 a) Grafik Hubungan Tegangan Regangan Triaksial OMC dan Jenuh
 b) Diagram Mohr Triaksial Kondisi OMC dan Jenuh

Dari gambar grafik dan diagram Mohr triaksial dalam kondisi OMC didapatkan kohesinya sebesar $0,221 \text{ kg/cm}^2$ dan sudut geser tanahnya $1,947^\circ$ sehingga didapatkan nilai kuat geser sebesar $0,2817 \text{ kg/cm}^2$ atau $28,17 \text{ kN/m}^2$. Sedangkan dalam kondisi jenuh didapatkan nilai kohesi sebesar $0,033 \text{ kg/cm}^2$ dan sudut geser tanah $1,833^\circ$ sehingga didapatkan nilai kuat geser sebesar $0,0835 \text{ kg/cm}^2$ atau $8,35 \text{ kN/m}^2$.

4.4 Analisis Hasil Penelitian Model Tes

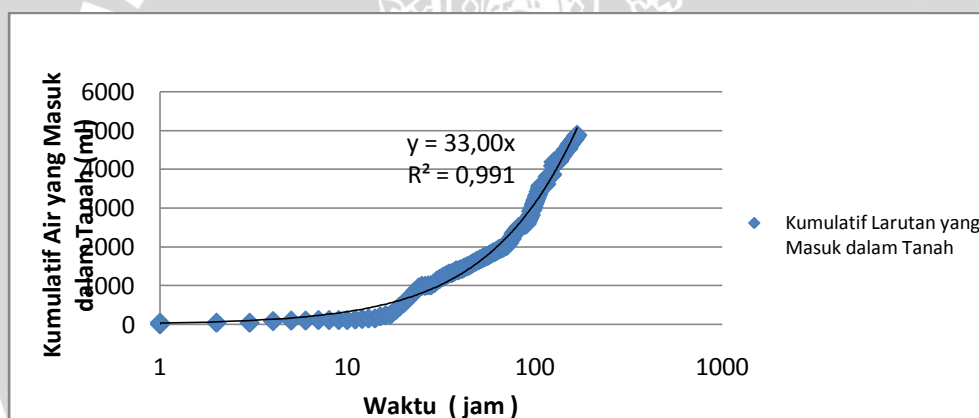
4.4.1 Volume Larutan yang Masuk ke dalam Tanah

Data yang diperoleh dari pemeriksaan debit larutan CaCl_2 yang masuk ke dalam tanah melalui anoda pada percobaan injeksi elektrokimia ini disajikan pada gambar 4.6 berikut ini:



Gambar 4.6 Grafik larutan yang masuk ke dalam tanah tiap jam

Dari grafik larutan yang masuk melalui anoda dapat dilihat bahwa larutan terkadang keluar sedikit dan terkadang keluar dalam jumlah yang cukup banyak. Hal ini dikarenakan beda potensial yang sering naik turun sehingga menyebabkan dorongan terhadap larutan yang keluar tiap jamnya selalu berbeda. Selain itu juga dikarenakan pengaturan kran pipa larutan yang secara manual (tidak konstan). Nilai rata – rata dari gambar 4.6 di atas sebesar 28,93 ml, sedangkan standard deviasinya 30,28 ml. Volume larutan yang diinjeksikan paling besar terjadi pada saat jam ke-125 yaitu sebesar 220 ml. Volume larutan minimum yaitu sebesar nol ml. Pada jam ke-168 larutan yang masuk dalam tanah dihentikan karena dalam proses dewatering yang tujuannya untuk mengetahui jumlah air yang dapat dikeluarkan dan kecepatan keluarnya air dari dalam tanah kaolin. Proses dewatering ini akan dijelaskan lebih lanjut pada analisis volume air yang keluar melalui katoda.



Gambar 4.7 Grafik kumulatif larutan yang masuk ke dalam tanah

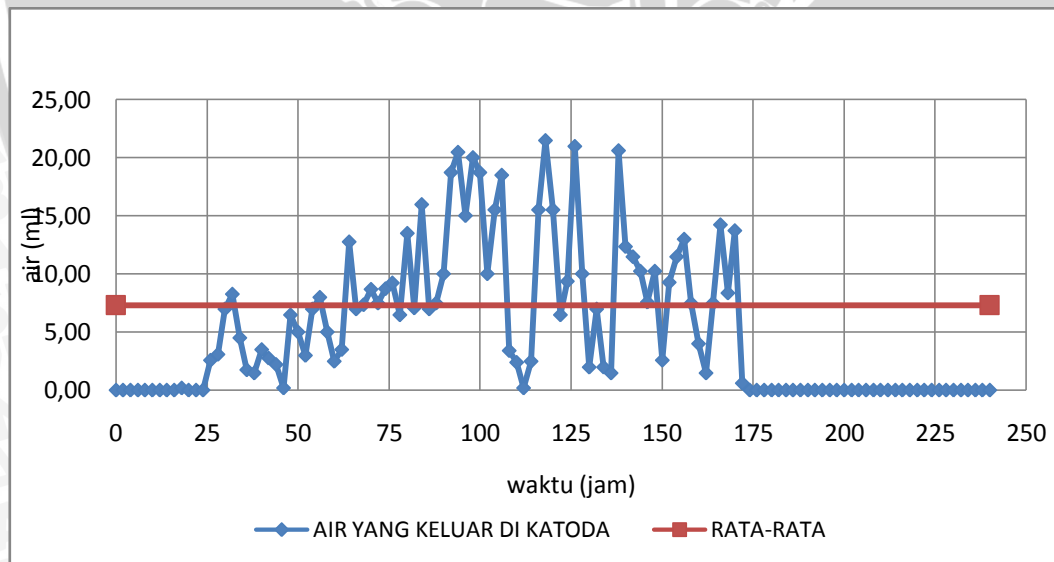
Gambar 4.7 memperlihatkan akumulasi larutan yang dapat diinjeksikan ke dalam tanah melalui anoda. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada awal proses injeksi elektrokimia larutan belum sepenuhnya terinjeksi karena tanah masih dalam proses penjenuhan, setelah itu mengalami kenaikan yang cukup tinggi tiap jamnya.

4.4.2 Volume Air yang Keluar

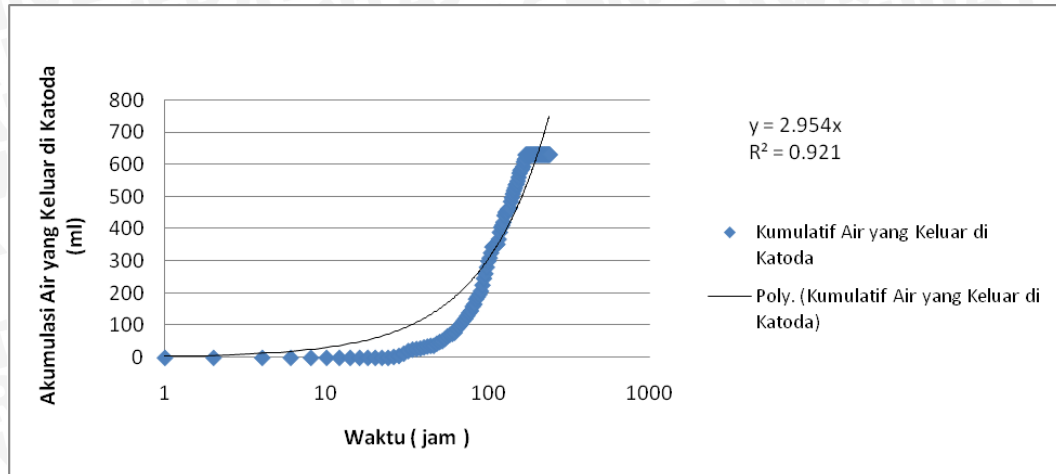
Jumlah air yang dapat dikeluarkan dari katoda selama proses injeksi elektrokimia semakin meningkat hingga 168 jam. Hal ini terjadi karena semakin

banyak larutan CaCl_2 yang dialirkan melalui anoda. Unsur Ca dalam larutan CaCl_2 bereaksi dengan tanah sehingga mengalami pematatan karena terjadi mobilitas ion. Sebaliknya, jumlah air yang dapat dikeluarkan dari katoda mengalami penurunan selama proses dewatering selama 72 jam karena larutan injeksi dihentikan sehingga semakin berkurangnya ikatan ion Cl^- dari larutan CaCl_2 yang akan dikeluarkan melalui pipa katoda dengan perantara aliran listrik.

Pada awal proses penginjeksian sampai pada jam ke-25 menunjukkan tidak adanya air yang keluar dari katoda. Pada saat setelah jam ke-25, volume air yang di dapat di katoda mengalami peningkatan. Hal tersebut berlangsung sampai jam ke-174 setelah injeksi dihentikan, volume air yang terdapat di katoda mengalami penurunan hingga tidak terdapat air sama sekali pada masing – masing katoda tersebut. Dari data yang diperoleh rata – rata air yang keluar di katoda selama penelitian ini yaitu sebesar 7,33 ml. Sedangkan standard deviasinya 6,12 ml. Maksimum air yang keluar adalah 21,5 ml, sedangkan volume air minimum yaitu sebesar nol ml. Data yang diperoleh dari pemeriksaan debit air yang keluar melalui katoda pada percobaan injeksi elektrokimia ini disajikan pada gambar 4.8(a)



(a)



(b)

Gambar 4.8 (a) Grafik air yang keluar melalui katoda

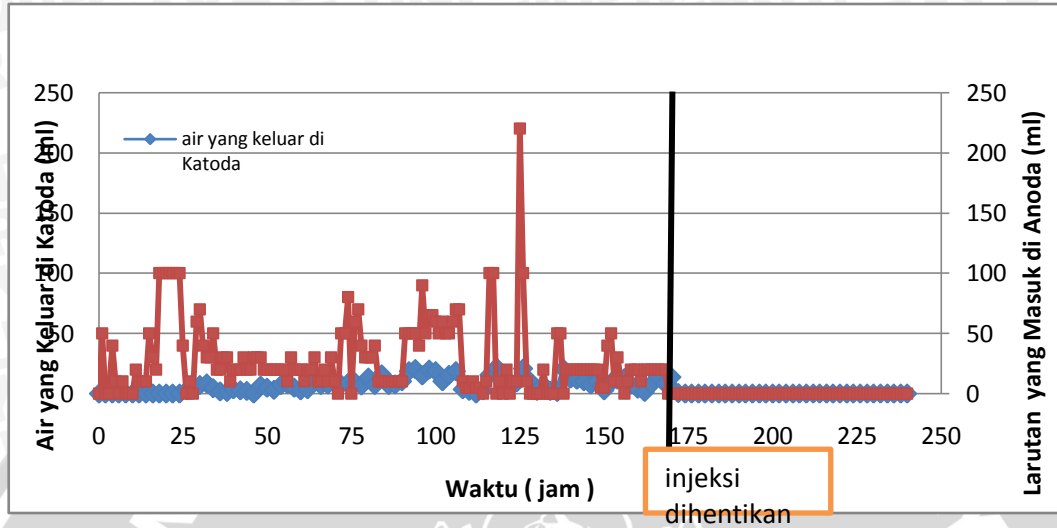
(b) Grafik kumulatif air yang keluar melalui katoda

Pola keluarnya air selama penelitian bila dilihat dari grafik kumulatif berbentuk parabola atau non linier. Hal ini disebabkan laju aliran air hanya efektif pada saat awal percobaan sampai batas tertentu. Penjelasan ini dapat terlihat dari grafik air yang keluar melalui katoda. Pada saat awal injeksi, air masih belum keluar karena dalam masa penjenuhan. Setelah mengalami proses penjenuhan, air mulai keluar melalui katoda. Kemudian pada saat dewatering yaitu larutan dihentikan, air keluar namun dalam jumlah yang sangat sedikit dan membutuhkan waktu yang sangat lama. Laju pengeluaran air akan semakin kecil dan tidak efektif apabila waktu pelaksanaan injeksi terlalu lama.

4.4.3 Perbandingan Larutan yang Diinjeksikan Dengan yang Didewatering

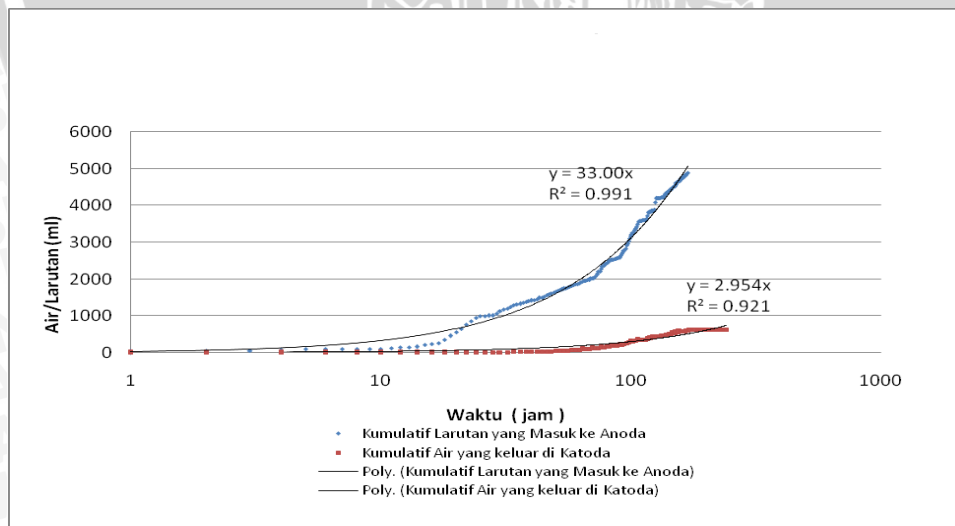
Dari pembahasan sebelumnya dapat dibuat suatu perbandingan antara larutan CaCl_2 yang diinjeksikan dengan air yang diperoleh pada katoda. Pada gambar 4.9 dibawah ini dapat ditunjukkan bahwa pada saat awal proses injeksi elektrokimia, larutan CaCl_2 yang diinjeksikan dalam keadaan maksimum, sedangkan pada kurva air yang diperoleh pada katoda masih tidak terdapat air. Setelah terdapatnya air pada katoda, keadaan larutan cenderung konstan walaupun ada kenaikan – kenaikan kecil. Selama berlangsungnya proses injeksi elektrokimia, air yang keluar di katoda mengalami peningkatan. Setelah kran

larutan dimatikan (*proses dewatering*), volume air yang berada di katoda mengalami penurunan hingga tidak terdapat sama sekali air pada masing – masing katoda.



Gambar 4.9 Perbandingan air di katoda dan larutan di anoda

Kumulatif larutan injeksi elektrokimia yang dialirkan melalui anoda sebesar 4890 ml. Sedangkan, kumulatif air yang dikeluarkan dari pipa katoda sebesar 630,7 ml. Perbandingan kumulatif larutan yang mengalir melalui anoda dengan kumulatif air yang dikeluarkan dari katoda yaitu sebesar 12,9 %. Perbandingan kumulatif larutan injeksi yang dialirkan melalui anoda dengan kumulatif air yang dikeluarkan dari katoda dapat dilihat pada gambar 4.10



Gambar 4.10 Kurva Perbandingan Kumulatif Larutan yang Diinjeksikan dengan Kumulatif Air yang Keluar Dari Katoda

Pembahasan yang telah diuraikan di atas sesuai dengan teori Helmholtz-Smoluchowski yang menyatakan bahwa jika material berpori atau tanah yang basah khususnya tanah lempung dikenai arus listrik atau terdapat beda potensial listrik maka timbulnya aliran-aliran partikel yang mana partikel-partikel (larutan CaCl_2) tersebut menggantikan atau mengisi ruang-ruang pori kosong yang telah ditinggalkan oleh air pori. Air pori dalam tanah cenderung bergerak mendekati katoda (kutub negatif) karena kandungan kation bebasnya.

Selama proses injeksi elektrokimia, dilakukan pergantian pipa anoda sebanyak 9 kali dan 1 kali setelah proses dewatering. Pipa anoda diganti karena unsur tembaga pada anoda bereaksi dengan oksigen diluar sehingga mengalami oksidasi akibatnya terjadi perubahan warna menjadi hijau di pipa anoda dan tanah di sekitar anoda. Pipa anoda mengalami patah karena larutan CaCl_2 yang dialirkan ke tanah melalui pipa anoda bersifat korosif terhadap tembaga. Uji injeksi elektrokimia dapat dilihat pada gambar 4.11 dan pipa anoda yang mengalami korosif pada gambar 4.12 di bawah ini:



Gambar 4.11 Model Test Injeksi Elektrokimia



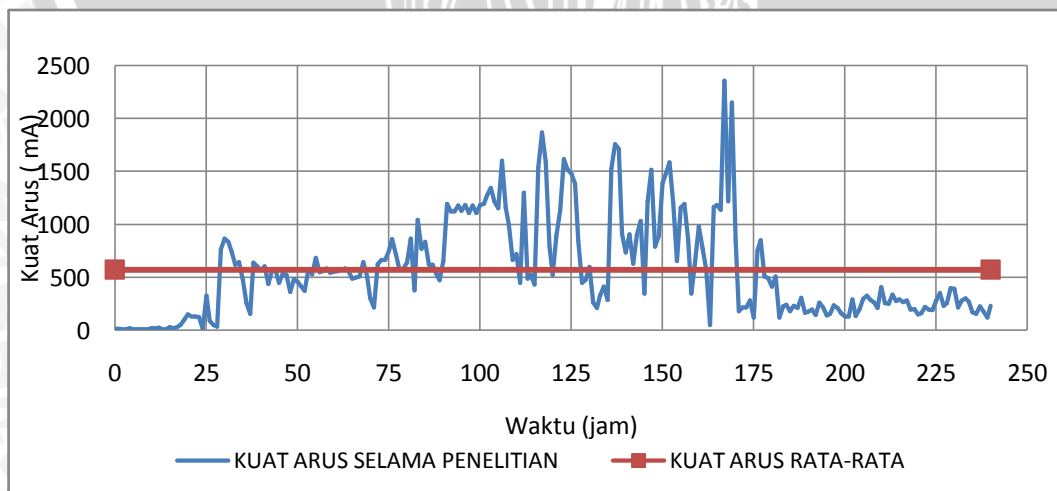
Gambar 4.12 Pipa Anoda yang Korosif

4.4.4 Kebutuhan Kuat Arus, Tegangan, dan Energi pada Proses Injeksi Elektrokimia

Menurut James K. Mitchell, 1976 dan Gray, 1966 efisiensi dari metode injeksi elektrokimia dilihat dari kemampuannya untuk mengeluarkan air pada suatu titik benda uji yang tergantung pada jenis tanah, beda potensial yang dibangkitkan, dan kuat arus yang digunakan. Jumlah air yang dapat dikeluarkan sebanyak 12,9% dari jumlah mula-mula. Dengan voltase yang besar menyebabkan penyusutan pada tanah berlangsung cepat. Penyusutan ini disebabkan oleh pergerakan air yang cepat atau tarikan terhadap partikel tanah yang cukup besar oleh katoda. Besarnya penyusutan menyebabkan tanah cepat menjauh dari elektroda dan kecepatan air yang keluar semakin lambat karena kontak tanah terhadap elektroda semakin kecil. Pada metode injeksi elektrokimia, untuk mencapai tujuan pengeluaran air yang diinginkan besar voltase, kuat arus, dan waktu yang tersedia menjadi faktor pertimbangan yang cukup penting. Keluarnya air dari sampel tanah mempengaruhi tegangan yang disebabkan oleh air pori yang cukup besar pada tanah lempung.

4.4.4.1 Kuat Arus Listrik

Berdasarkan hukum ohm, kuat arus listrik berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan hambatan. Sehingga dari hukum ohm tersebut dapat dirumuskan $I = V / R$, dimana I adalah kuat arus (Ampere), V adalah tegangan listrik (Volt) dan R adalah hambatan (Ohm). Data yang diperoleh tersaji pada grafik 4.13 di bawah ini:



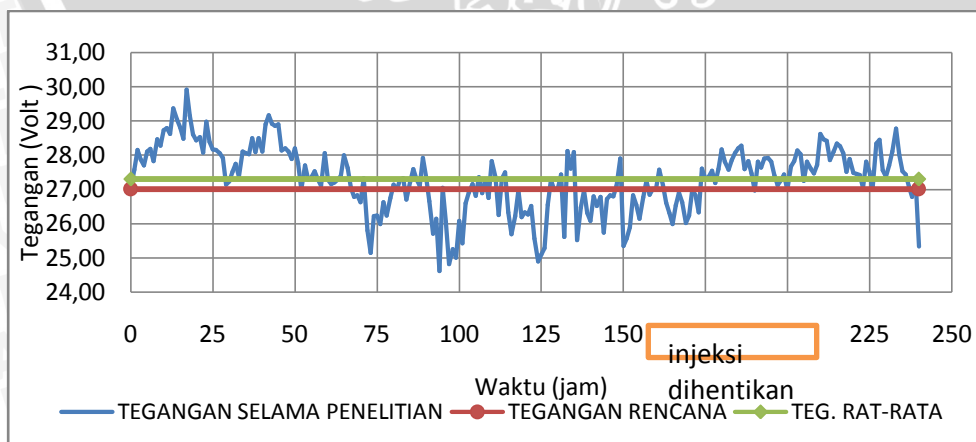
Gambar 4.13 Hubungan Antara Kuat Arus dan Waktu

Gambar 4.13 di atas memperlihatkan bahwa pada saat dimulainya penginjeksian hingga jam ke-30, arus listrik yang mengalir mengalami peningkatan yang cukup besar. Hal ini dikarenakan proses penjenuhan tanah oleh larutan CaCl_2 . Arus listrik mengalami penurunan setelah jam ke 171, akan tetapi penurunannya ini relatif stabil. Penurunan grafik kuat arus tersebut dikarenakan tanah sedang mengalami proses dewatering. Dari grafik di atas dapat diperoleh nilai rata – rata kuat arus listrik yaitu sebesar 568,95 mA. Sedangkan deviasi standarnya adalah 459,88 mA. Kuat arus listrik maksimum terjadi pada jam ke-167 yaitu sebesar 2359 mA dan kuat arus minimum terjadi pada saat jam ke-0 yaitu sebesar 5 mA. Banyaknya kandungan air di dalam tanah dipengaruhi oleh banyaknya larutan elektrolit yang dialirkan melalui anoda karena Larutan CaCl_2 mengandung zat elektrolit yang dapat menghantarkan arus listrik dan sebagai pendorong air keluar menuju katoda

4.4.4.2 Tegangan Listrik

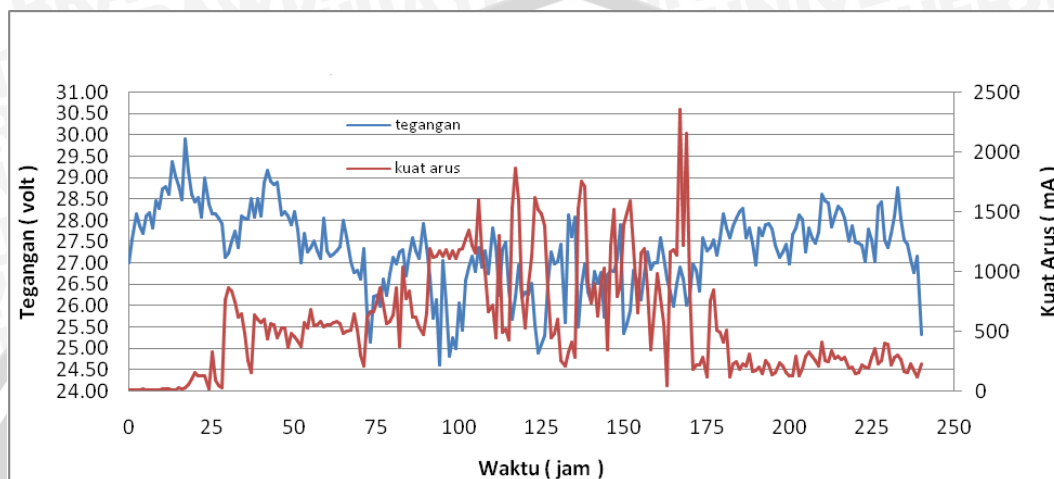
Berdasarkan teori Helmholtz-Smoluchowski maupun teori Schmid yang mengadopsi hukum Darcy, beda tegangan mempunyai pengaruh sebanding dengan volume. Jadi semakin besar voltase maka volume air yang diperoleh di katoda juga semakin besar. Berdasarkan hukum ohm, voltase berbanding lurus terhadap arus listrik dan hambatan dengan persamaan $V = I.R$.

Pada penelitian injeksi elektrokimia, besar beda tegangan yang diberikan kepada tanah melalui elektroda yaitu 27 volt atau 1,5 volt / cm. Namun pada pelaksanaannya tegangan mengalami naik turun selama proses injeksi elektrokimia. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.14 di bawah ini:



Gambar 4.14 Hubungan Antara Tegangan dan Waktu

Dari gambar 4.14 terlihat bahwa tegangan rata – rata sebesar 27,30 volt berada di atas tegangan rencana. Standar deviasi tegangan adalah 0,936 volt. Tegangan terbesar selama penelitian yaitu terjadi pada jam ke-17 sebesar 29,91 volt. Sedangkan tegangan terkecil terjadi pada saat jam ke-94 yaitu sebesar 24,62 volt.



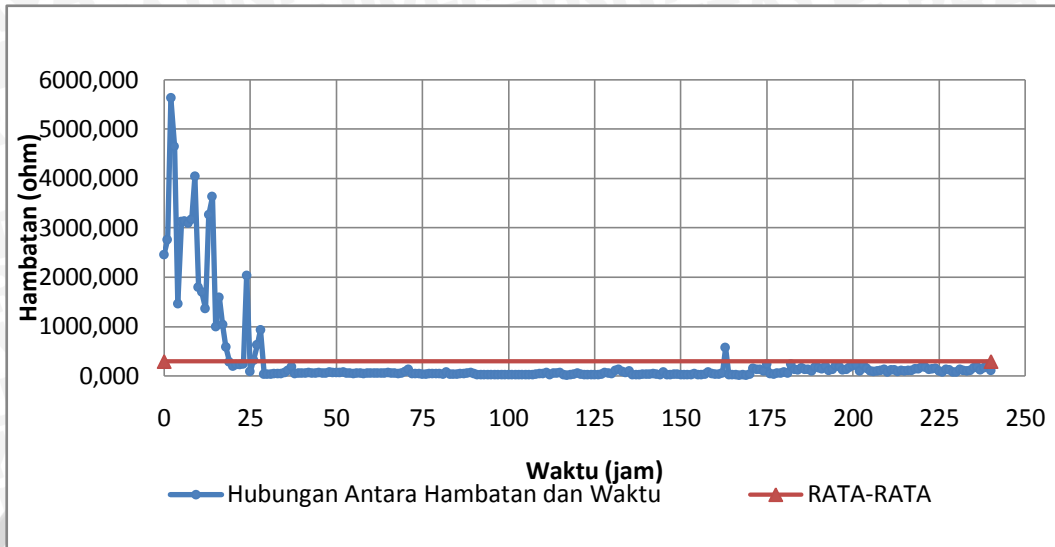
Gambar 4.15 Perbandingan Antara Tegangan dan Kuat Arus

Gambar 4.15 di atas merupakan perbandingan antara tegangan dan kuat arus terhadap waktu. Dari grafik dapat dilihat bahwa tegangan terhadap waktu mengalami naik turun yang relatif konstan mulai awal proses injeksi elektrokimia sampai dewatering berakhir. Berbeda dengan kuat arus listrik yang mengalami kenaikan cukup tajam pada jam tertentu dan stabil pada saat tanah mengalami masa penjenjuran dan arus listrik mengalami penurunan pada saat dewatering.

4.4.4.3 Hambatan Listrik

Berdasarkan hukum ohm, tegangan berbanding lurus terhadap arus dan hambatan, mengikuti persamaan $V = I.R$. Pada proses dewatering terjadi penurunan arus listrik sehingga hambatan listrik juga akan semakin naik. Hambatan rata-rata selama penelitian adalah $290,22 \Omega$, dengan deviasi standardnya $786,56$. Pada awal injeksi elektrokimia terjadi kenaikan hambatan yang cukup besar. Hambatan maximum terjadi pada jam ke-2 yaitu sebesar 5630Ω . Namun setelah proses penjenjuran tanah, hambatan mulai menurun karena arus

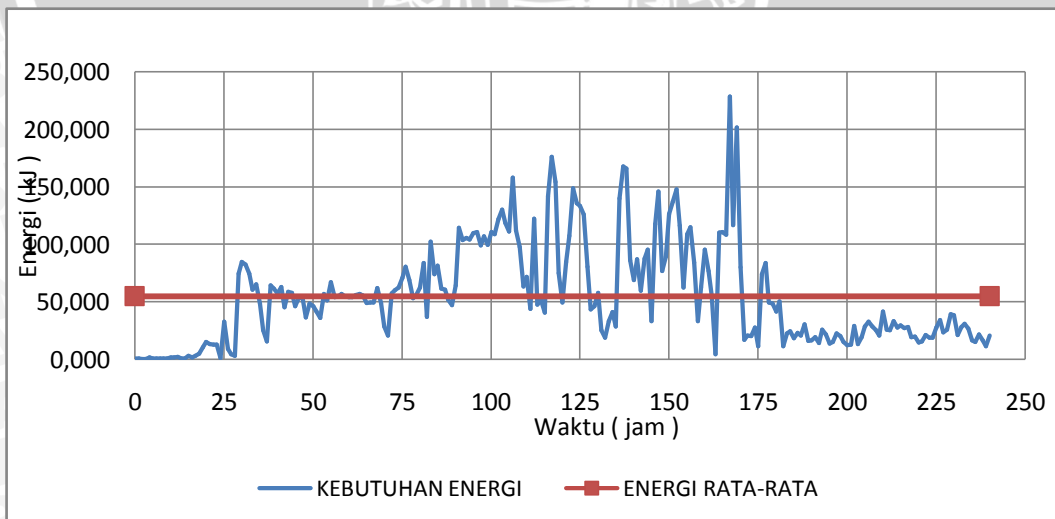
listrik yang dikeluarkan semakin besar. Hambatan minimum terjadi pada jam ke-175 yaitu sebesar 11,40 Ω. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.16 berikut ini:



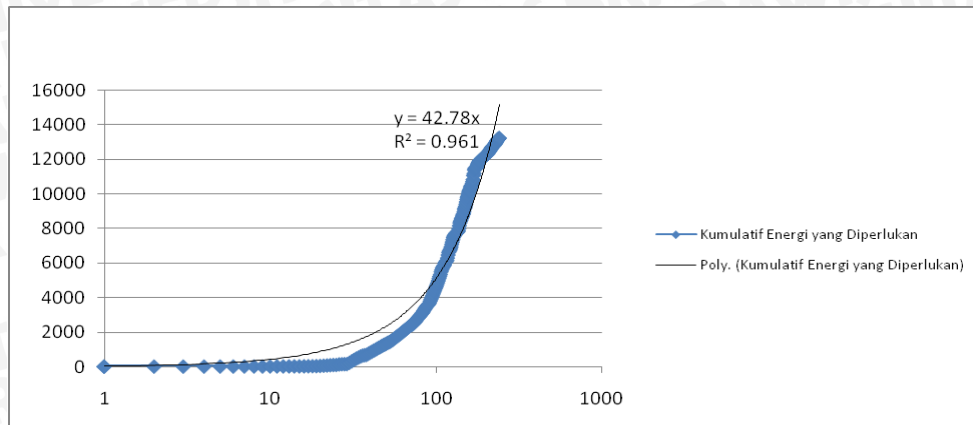
Gambar 4.16 Hubungan Antara Hambatan dan Waktu

4.4.4.4 Energi Listrik

Besarnya energi yang dikeluarkan oleh arus listrik adalah $W = V.I.t$, dimana W adalah energi (kJ), V adalah tegangan (Volt), I adalah kuat arus listrik (Ampere), dan t adalah waktu (second). Energi yang dihasilkan nantinya akan digunakan untuk mengestimasi biaya yang harus dikeluarkan selama proses injeksi elektrokimia.

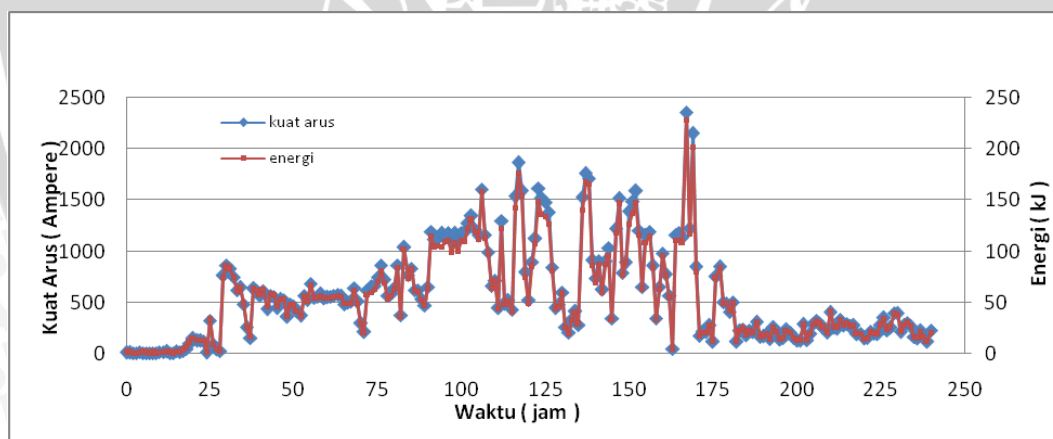


Gambar 4.17 Kebutuhan Energi Terhadap Waktu



Gambar 4.18 Kumulatif Energi yang Diperlukan

Gambar 4.17 memperlihatkan bahwa pada saat dimulainya penginjeksian hingga jam ke-30, energi listrik yang dikeluarkan cukup besar. Energi listrik mengalami penurunan setelah jam ke 171, akan tetapi penurunannya relatif stabil. Kurva kumulatif energi yang dibutuhkan yaitu sebesar 13217 kJ yang dapat dilihat pada gambar 4.18. Dari kurva tersebut dapat dilihat bahwa semakin lama waktu yang digunakan maka semakin besar pula energi yang dibutuhkan.



Gambar 4.19 Perbandingan Kuat Arus dan Energi yang Diperlukan

Gambar di atas memperlihatkan perbandingan antara kuat arus terhadap waktu dengan kebutuhan energi yang diperlukan. Dari kurva di atas dapat dilihat bahwa kurva antara arus terhadap waktu dengan energi terhadap waktu adalah sebanding atau sama besar. Hal ini disebabkan oleh semakin besar arus yang terjadi, maka energi yang dibutuhkan juga semakin besar.

4.4.5 Permeabilitas Elektrosmis

Koefisien elektroosmosis k_e adalah sifat tanah yang menyatakan bahwa kecepatan aliran air akibat beda potensial tertentu. Pengukuran dari k_e adalah dengan menentukan jumlah aliran air (q_A) yang mengalir pada sampel tanah yang diketahui luas (A) dan panjangnya (L) pada beda potensial (V) tertentu. Harga k_e dapat dihitung dengan persamaan:

$$q_A = k_e \cdot i_e \cdot A$$

$$q_A = k_e \cdot V/L \cdot A$$

$$\text{sehingga } k_e = (q_A/i_e \cdot A)$$

Pada percobaan dilakukan pengambilan volume air yang keluar melalui katoda tiap 1 jam selama 10 hari. Jarak antar katoda pada sampel tanah adalah 18 cm dengan tinggi tanah 20 cm dan tegangan listrik yang digunakan adalah 27 Volt. Harga k_e dapat dilihat pada tabel 4.4

Tabel 4.4 Perhitungan Koefisien Elektroosmosis

Waktu pembacaan		Volume	Debit	Gradien potensial listrik	$k_e = (q_A/i_e \cdot A)$
Tanggal	Waktu	(ml)	(ml/jam)	(Volt/cm)	($\text{cm}^2/\text{detik.volt}$)
5 Maret 2010	13.00			1.50	
6 Maret 2010	13.00	0.2	0.00833	1.58	3.0587E-09
7 Maret 2010	13.00	43.85	1.82708	1.56	6.7706E-07
8 Maret 2010	13.00	77.3	3.22083	1.43	1.3004E-06
9 Maret 2010	13.00	139.85	5.82708	1.45	2.3301E-06
10 Maret 2010	13.00	143.75	5.98958	1.46	2.3705E-06
11 Maret 2010	13.00	114.05	4.75208	1.43	1.9239E-06
12 Maret 2010	13.00	97.35	4.05625	1.48	1.5873E-06
13 Maret 2010	13.00	14.35	0.59792	1.54	2.2542E-07
14 Maret 2010	13.00	0	0.00000	1.57	0
15 Maret 2010	13.00	0	0.00000	1.41	0
	Jumlah	630.7		k_e rata-rata	1.0418E-06

Dari tabel perhitungan menunjukkan jika volume air yang keluar semakin sedikit maka koefisien elektroosmosis juga semakin kecil seiring dengan menurunnya derajat kejenuhan tanah. Nilai k_e rata-rata didapatkan sebesar $1,0418 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{detik.volt}$ atau 17% dari permeabilitas hidrolis dengan nilai k_h sebesar $6,08961 \times 10^{-8}$.

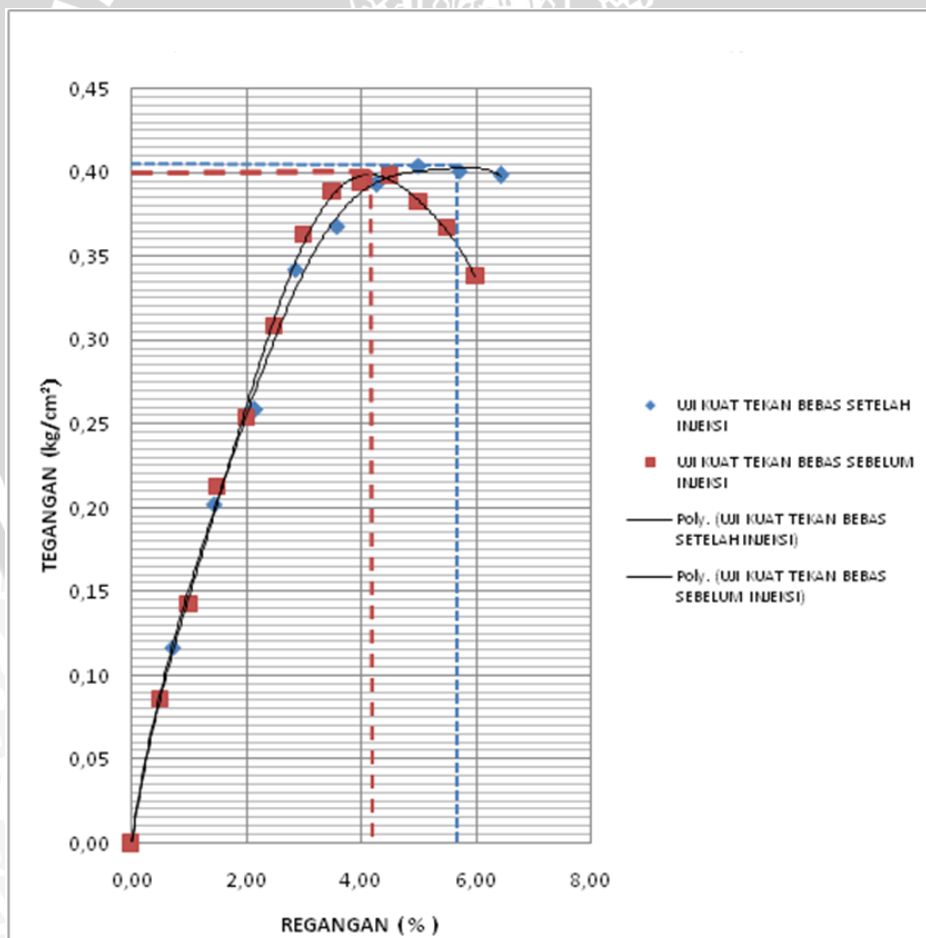
4.4.6 Kondisi tanah setelah perbaikan tanah

4.4.6.1 Unconfined

Hasil uji unconfined dapat dilihat pada gambar 4.20 dan perhitungannya diasumsikan dalam keadaan jenuh pada tabel 4.5 di bawah ini :

Tabel 4.5 Perhitungan Kuat Geser Unconfined

Pengujian Unconfined			
Parameter sebelum injeksi dalam keadaan OMC		Parameter setelah injeksi	
w (%)	q_u (kg/cm ²)	w (%)	q_u (kg/cm ²)
25,5	0,395	26,55	0,405



Gambar 4.20 Perbandingan Uji Unconfined Sebelum dan Setelah Perbaikan

Dari tabel perhitungan dan gambar dapat dilihat bahwa nilai kuat geser tanah setelah perbaikan tanah dengan injeksi larutan CaCl_2 mengalami peningkatan yang tidak terlalu tinggi jika dibandingkan dengan sebelum perbaikan tanah dalam keadaan OMC yaitu sebesar $0,01 \text{ kg/cm}^2$ atau 1 kN/m^2 , sedangkan kadar air tanahnya meningkat $1,05 \%$.

Peningkatan kuat geser pada uji kuat tekan bebas terjadi karena ada penambahan senyawa klorida atau garam yang sifatnya meningkatkan kadar kepadatan tanah. Selain itu apabila kapur bereaksi dengan tanah lempung atau dengan silika hidrat (SiO_2) maka akan membentuk gel yang kuat dan keras yaitu kalsium silikat yang fungsinya untuk melapisi dan mengikat antar partikel tanah lempung (Diamond & Kinter, 1965 dalam Ingles dan Metcalf, 1972).

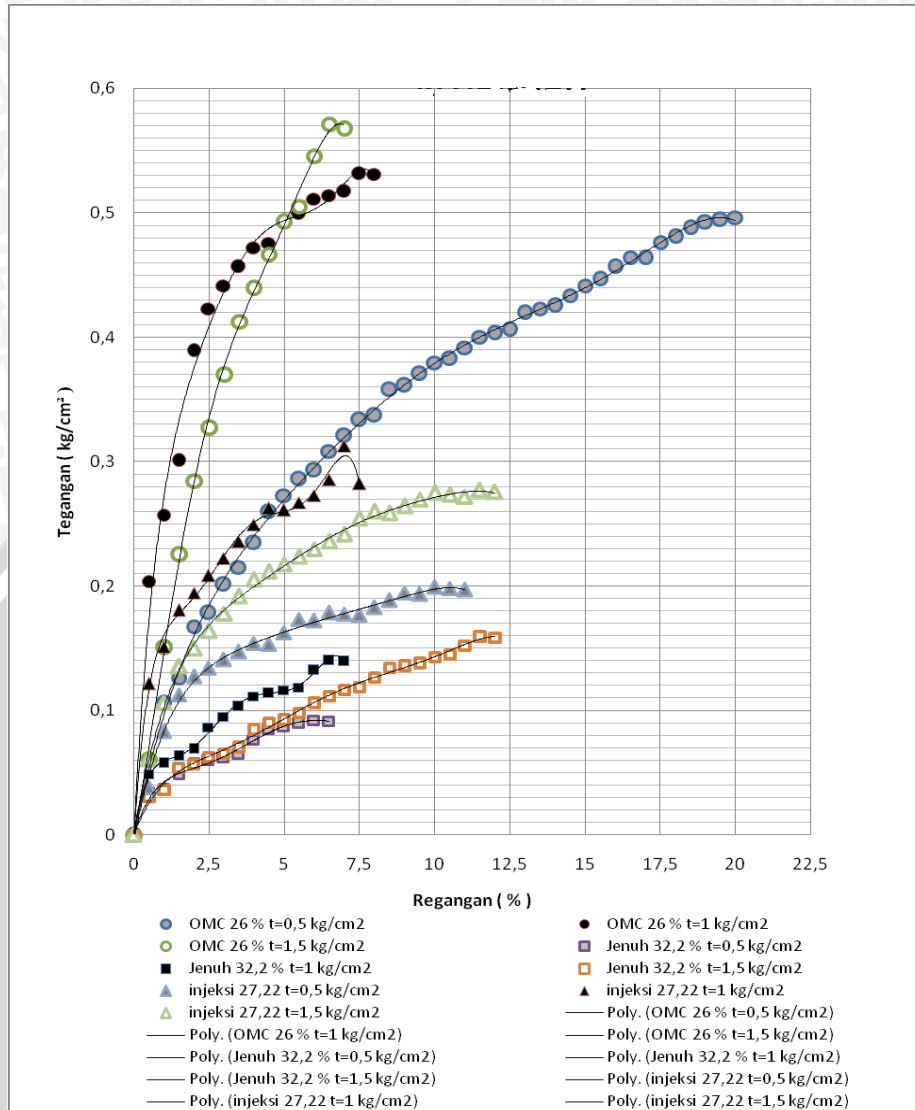
Jika dilihat pada grafik, regangan pada tanah sebelum injeksi lebih kecil bila dibandingkan dengan tanah setelah injeksi. Hal ini disebabkan proses sementasi yang belum sempurna, gumpalan atau flokulasi pada tanah yang merekatkan antar partikel hanya terjadi di beberapa titik saja karena adanya flokulasi garam yang menyebabkan struktur tanah cenderung berubah pada kadar air rendah dengan peningkatan konsentrasi garam (Abood Tamadher, 2007).

4.4.6.2 Triaksial

Hasil perhitungan kuat geser triaksial pada kondisi sebelum injeksi dan setelah injeksi diasumsikan dalam keadaan jenuh dapat dilihat pada tabel 4.6 dan grafik perbandingan tegangan regangannya pada gambar 4.21 di bawah ini :

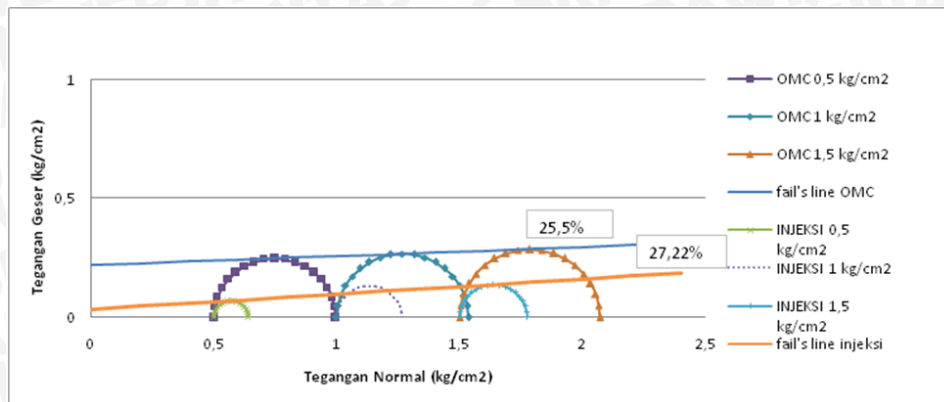
Tabel 4.6 Perhitungan Kuat Geser Triaksial

Pengujian Triaksial								
Parameter sebelum injeksi dalam keadaan OMC			Parameter sebelum injeksi pada keadaan jenuh 32,2%			Parameter setelah injeksi		
w (%)	c	ϕ	w (%)	c	ϕ	w (%)	c	ϕ
25,5	0,221	2,062	32,2	0,033	1,833	27,22	0,034	3,609



Gambar 4.21 Perbandingan Uji Triaksial Sebelum dan Setelah Perbaikan

Hasil uji triaxial menunjukkan nilai sudut gesek dalam tanah setelah perbaikan tanah dengan injeksi larutan CaCl₂ mengalami peningkatan yang cukup tinggi dan kohesi tanah mengalami penurunan jika dibandingkan dengan sebelum perbaikan tanah dalam keadaan OMC yaitu sudut gesek tanah mengalami peningkatan sebesar 1,547° dan kohesi tanah mengalami penurunan sebesar 0,187 kg/cm². Dalam penelitian ini, kadar air tanah setelah perbaikan tanah mengalami peningkatan bila dibandingkan dengan kadar air tanah dalam keadaan OMC yaitu sebesar 1,72 %. Nilai sudut gesek dalam tanah setelah perbaikan tanah juga mengalami peningkatan yang cukup tinggi yaitu sebesar 1,776° dan kohesi tanah hanya mengalami peningkatan sebesar 0,001 kg/cm².



Gambar 4.22 Diagram Mohr Uji Triaksial

Dari diagram Mohr pada saat kondisi OMC dan setelah injeksi dapat dilihat bahwa kedua-duanya memiliki kuat geser yang sama pada saat tegangan normalnya sebesar 7,35 kg/cm². Jadi apabila tegangan normalnya kurang dari 7,35 kg/cm² maka kuat geser setelah injeksi akan lebih besar daripada saat kondisi OMC.

James K.Mitchell 1993 mengemukakan bahwa kuat geser terbesar akan berada pada daerah anoda dan kuat geser terkecil berada pada daerah katoda. Kesebandingan antara kuat geser dengan kadar air tanah dapat terbukti pada penelitian ini dengan nilai sudut geser dalam (ϕ) tanah bertambah besar sebanding dengan debit air yang keluar.

Namun dari data di atas terdapat hasil yang menyimpang dari kondisi pada umumnya yaitu adanya penurunan kohesi tanah dan kenaikan sudut perlawanan geser yang cukup besar sebanding dengan banyaknya air yang keluar. Kekuatan geser tanah lempung sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai kohesi tanah bukan sudut geser dalam tanah. Semakin besar kadar air pada tanah lempung akan mengurangi nilai kohesi tanah tersebut, sehingga pengurangan kadar air akan menyebabkan peningkatan nilai kohesi yang cukup besar dan perubahan sudut geser dalam yang tidak terlalu besar. Selain itu penambahan garam atau senyawa klorida dapat menurunkan kadar air karena flokulasi garam. Semakin tinggi kadar garam, semakin rendah pula kadar airnya (Abood Tamadher, 2007). Sedangkan pada data percobaan menunjukkan hasil yang sebaliknya yaitu besarnya volume air yang keluar sebanding dengan peningkatan sudut geser dalam dan penurunan nilai kohesi tanah dengan nilai lebih kecil dari 1.

Penyimpangan tersebut dapat disebabkan oleh beberapa hal, di antaranya:

1. Sampel tanah yang digunakan adalah mineral kaolin yang nilai plastisitas, kohesi, dan kembang susutnya tergolong rendah bila dibandingkan dengan mineral lempung lainnya.
2. Kandungan air dalam tanah masih cukup besar sehingga menyebabkan nilai kohesinya kecil.
3. Terbatasnya jumlah sampel dan waktu untuk proses dewatering yang terlalu singkat.
4. Ketidaktepatan dalam pelaksanaan pengujian kuat geser baik unconfined maupun triaksial terutama dalam pembuatan benda uji yang sulit dibentuk karena masih lunak.

Pada penelitian ini yang akan dilihat hanya kecenderungan peningkatan kuat geser tanah yang sebanding dengan volume air yang keluar, maka data tersebut masih dapat dipergunakan. Hal ini dapat dilihat dari penambahan senyawa klorida yang dapat meningkatkan kuat geser dan kekuatan tekan bebasnya meskipun peningkatannya terbilang kecil.

4.4.6.3 Berat Jenis Tanah Setelah Injeksi

Hasil perhitungan berat jenis tanah (Gs) setelah injeksi dapat dilihat pada tabel 4.7 di bawah ini:

Tabel 4.7 Perhitungan Berat Jenis Tanah

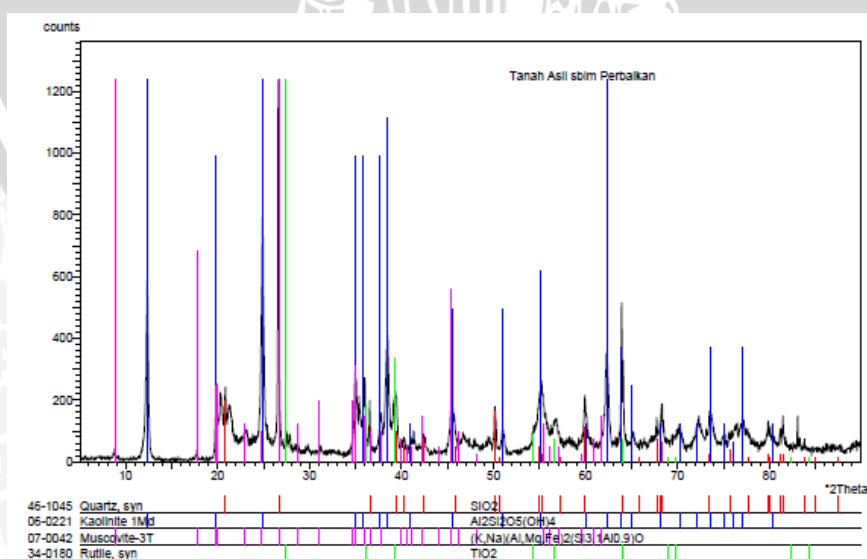
Labu Ukur E							
Berat Labu Ukur	49,25						
Berat Labu Ukur + Tanah kering	69,2						
Berat Tanah Kering	19,95						
Berat Labu Ukur + Air + Tanah kering	158,02	161,10	161,10	161,16	161,43	161,48	161,53
Suhu (°C)	66	57	52	45	39	33	31
Berat Labu Ukur + Air	147,57	148,12	148,43	148,86	149,22	149,59	149,71
Berat Jenis Air (Gt)	0,9800	0,9848	0,9872	0,9902	0,9926	0,9947	0,9954
Berat Jenis Tanah (GS)	2,0571	2,8175	2,7061	2,5840	2,5581	2,4630	2,4429
Rata-rata Berat Jenis	2,52						

Labu Ukur B						
Berat Labu Ukur	51,06					
Berat Labu Ukur + Tanah kering	71,06					
Berat Tanah Kering	20					
Berat Labu Ukur + Air + Tanah kering	150,56	152,57	153,54	153,75	153,93	154,08
Suhu (°C)	64	58	41	36	33	31
Berat Labu Ukur + Air	139,57	139,86	140,69	140,94	141,08	141,18
Berat Jenis Air (Gt)	0,9811	0,9857	0,9887	0,9937	0,9947	0,9954
Berat Jenis Tanah (GS)	2,1845	2,7151	2,7771	2,7778	2,7937	2,8165
Rata-rata Berat Jenis	2,68					

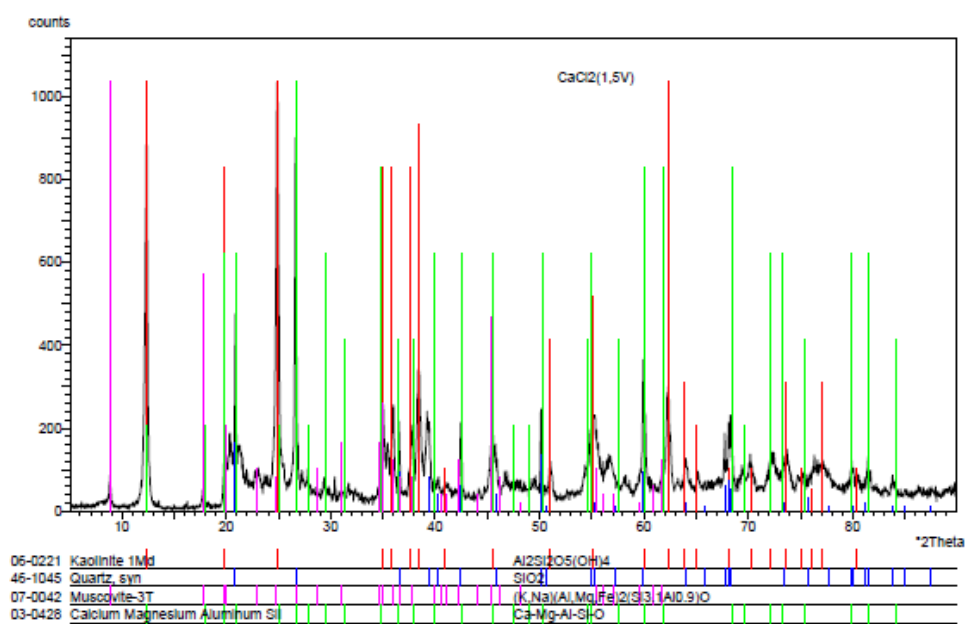
Dari hasil penelitian, didapatkan nilai rata-rata berat jenis butiran tanah (Gs) setelah injeksi adalah sebesar 2,6 gr/cm³. Sehingga dapat disimpulkan bahwa tanah ini memang mengandung mineral kaolinit. Hal ini dapat dibuktikan dengan adanya uji x-ray yang ada pada penjelasan selanjutnya.

4.4.6.4 X-Ray

Hasil uji x-ray digunakan untuk mengetahui mineral-mineral penyusun komposisi tanah kaolin yang terbaca pada puncak grafik defraksi sinar X. Pengujian komposisi kimia tanah untuk mengetahui unsur-unsur dominan penyusun tanah kaolin sebelum dan sesudah injeksi. Hasil uji x-ray sebelum injeksi dapat dilihat pada gambar 4.23 dan setelah injeksi pada gambar 4.24 di bawah ini:



Gambar 4.23 Hasil Uji X-Ray Lempung Pasiran Sebelum Injeksi



Gambar 4.23 Hasil Uji X-Ray Lempung Pasiran Setelah Injeksi

Dari gambar grafik dapat dilihat adanya peningkatan jumlah sinar yang dapat dipantulkan pada tanah lempung yang telah diinjeksi. Ada 3 titik perubahan yang relatif besar yang dapat mempengaruhi perubahan unsurnya. Yaitu pada jarak $3,34\text{\AA}$, $3,57\text{\AA}$, dan $7,15\text{\AA}$. Hal ini dapat dibuktikan dengan adanya senyawa baru dalam butiran-butiran lempung yang telah dihaluskan sebanyak 100 gram yaitu Calcium Magnesium Aluminium Silikat Ca-Mg-Al-Si-O . Unsur Si dan Al pada tanah kaolin bereaksi dengan CaCl_2 dalam jangka waktu tertentu. Selain itu senyawa TiO_2 dapat berubah bentuk menjadi senyawa magnesium dikarenakan adanya perlakuan injeksi CaCl_2 pada tanah lempung kaolin sehingga terjadi perubahan komponen karena perubahan nomor atom dan nomor massanya.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

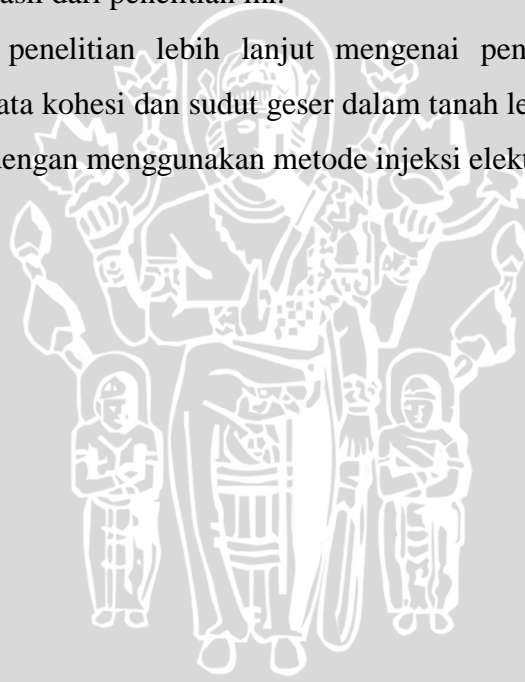
Dari peneitian tersebut dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Kuat geser tanah lempung pasiran sebelum mengalami perbaikan dengan uji unconfined sebesar $0,115 \text{ kg/cm}^2$ atau $11,5 \text{ kN/m}^2$. Sedangkan kuat geser tanah lempung pasiran sebelum mengalami perbaikan dengan uji triaksial dalam keadaan OMC sebesar $0,2817 \text{ kg/cm}^2$ atau $28,17 \text{ kN/m}^2$ dan keadaan jenuh sebesar $0,0835 \text{ kg/cm}^2$ atau $8,35 \text{ kN/m}^2$.
2. Terjadi peningkatan kuat geser pada uji kuat tekan bebas akibat larutan CaCl_2 10 % terhadap kuat geser tanah lempung pasiran Regangan pada tanah sebelum injeksi lebih kecil bila dibandingkan dengan tanah setelah injeksi. Hal ini disebabkan proses sementasi yang belum sempurna dan flokulasi garam yang menyebabkan struktur tanah cenderung berubah pada kadar air rendah dengan peningkatan konsentrasi garam
3. Peningkatan kuat geser lempung pasiran setelah perbaikan dengan uji unconfined sebesar $0,01 \text{ kg/cm}^2$ atau 1 kN/m^2 . Dengan uji triaksial pada kondisi OMC dan setelah injeksi dapat dilihat bahwa kedua-duanya memiliki kuat geser yang sama pada saat tegangan normalnya sebesar $7,35 \text{ kg/cm}^2$.
4. Terbentuk senyawa baru dalam butiran-butiran lempung yang telah dihaluskan sebanyak 100 gram yaitu Calcium Magnesium Aluminium Silikat Ca-Mg-Al-Si-O.

5.2 Saran

Penelitian injeksi elektrokimia ini secara keseluruhan telah memberikan hasil yang baik. Namun apabila akan dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh larutan CaCl_2 dengan konsentrasi 10% dan pada tegangan 1 volt/cm ini terhadap kuat geser tanah lempung pasiran, maka perlu diperhatikan hal – hal berikut :

1. Literatur baik dari buku – buku maupun jurnal – jurnal penelitian terdahulu akan sangat membantu dalam pengolahan data.
2. Penguasaan teori sangat membantu dalam menetapkan metode penelitian yang lebih baik sehingga didapatkan hasil yang lebih akurat.
3. Selain triaksial dan unconfined untuk pengujian kuat geser, sebaiknya digunakan pula van shear agar dapat mengetahui pola keruntuhan yang terjadi dan mendapatkan nilai kohesi dan sudut geser dalam yang lebih akurat.
4. Arus listrik yang digunakan hendaknya lebih stabil.
5. Alat uji kuat geser seperti triaksial dan unconfined harus diperiksa lebih dulu untuk menjamin keakuratannya karena hal tersebut sangatlah mempengaruhi hasil dari penelitian ini.
6. Perlu diadakan penelitian lebih lanjut mengenai penyebab dan solusi penyimpangan data kohesi dan sudut geser dalam tanah lempung kaolin dari hasil pengujian dengan menggunakan metode injeksi elektrokimia.



DAFTAR PUSTAKA

- Abood, Tamadher T., 2007, Stabilisation of Silty Clay Using Chloride Compounds, *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2, No. 1, 102-110`
- Azzam, R., 1997, Elektrochemische Bodenverfestigung des Baugrunds der St. Nikolauskirche in Walbeck-Geldern, *Geotechnik* Vol. 20, No.3, p. 204-214
- Bowles, J.E., 1991, *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*, Edisi Kedua, Jakarta : Erlangga
- Craig, R.F., 1987, *Mekanika Tanah*, Edisi Keempat, Jakarta : Erlangga.
- Draganov, L, et. all., 1988, *Erfolgreiche Elektrochemische Verfestigung von Boeden im Gleisbett von Eisenbahnlinien*, in Freiburger Forschunghefte, Spezialverfahren im Bergbau und Bauwesen, A 771
- Guggenheim and Martin, 1995, *Definition of Clay and Clay Mineral: Joint Report of The AIPEA Nomenclature and CMS Nomenclature Commite , Clay and Clay Mineral*, Vol 43, No.2, 255-256
- Hardiyatmo, H.C., 1992, *Mekanika Tanah 1*, Jakarta : PT Gramedia Pustaka Utama.
- Mitchell, J.K., 1993, *Fundamental of Soil Behavior*, 2nd edition, John Willey Scientific, Toronto
- Rachmansyah, A., 2002, Soil Improvement with Electroosmosis Methode, *Research Report*, Toray Foundation, Unpublished
- Rachmansyah, A, 2006, Pengaruh Kadar Air pada Saat Pemadatan Terhadap Kuat Geser Tanah Lempung Kaolin, *Jurnal Teknik* Edisi Agustus 2006
- Rosalina, Happy, 2002. Pengaruh Dewatering dengan Metode Elektroosmosis Terhadap Daya Dukung Tanah Lempung. *Skripsi* tidak di publikasikan. Malang: Universitas Brawijaya