

**ANALISA HUBUNGAN KEPADATAN DAN SWELING PADA
TANAH LEMPUNG EKSPANSIF**

¹Misdi

¹*Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik,
Universitas Alwashliyah Medan*

Jl. S.M.Raja KM 5,5 No 10 Medan Telp/Fax : 061-7851881

**Email: misdijunaidi@gmail.com*

ABSTRAK

Permasalahan pada tanah lempung yang memiliki indeks plastisitas yang tinggi selain daya dukung yang rendah adalah masalah pengembangan (*swelling*) yang cukup besar yang sering menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan seperti retaknya dinding, terangkatnya pondasi dan jalan bergelombang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari besarnya pengembangan dari tanah lempung ekspansif pada tingkat pemadatan dan kadar air awal yang berbeda - beda. Untuk mengetahui besarnya tingkat pengembangan (ekspansivitas) tanah, perlu dilakukan penelitian di Laboratorium, seperti uji Indeks Propertis serta CBR dan swelling test . Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pengembangan tanah ekspansif sangat tergantung pada besarnya kadar air awal dari tanah tersebut. Selain itu tingkat pemadatan juga turut mempengaruhi pengembangan , dimana semakin tinggi tingkat kepadatan tanah semakin besar pula potensi pengembangan (*swelling potential*). Oleh karena itu pembangunan pada tanah ekspansif perlu didahului dengan perbaikan / stabilisasi tanah baik secara kimia maupun secara mekanik.

Kata kunci : swelling, lempung ekspansif, indeks propertis, CBR, stabilisasi

ABSTRACT

Beside the clayey soil has low bearing capacity, it has also a high plasticity index which is the significant swelling problem. It often leads to damage to structures such as wall cracks, foundation uplift, and uneven roads. The aim of this research is to determine the extent of expansion of expansive clayey soil at different compaction levels and initial moisture content. To ascertain the degree of soil expansiveness, laboratory research is necessary, including tests for Property Index, California Bearing Ratio (CBR), and swelling. The results of this study suggest that the expansion of expansive soil depends significantly on the initial moisture content of the soil. Additionally, the compaction level also influences the expansion, with higher soil density correlating with a greater potential for expansion (swelling potential). Therefore, construction on expansive soil should be preceded by soil improvement/stabilization, either chemically or mechanically.

Keywords: swelling, expansive clay, Property Index, CBR, stabilization

PENDAHULUAN

Tanah selalu mempunyai peranan yang penting pada suatu lokasi pekerjaan konstruksi. Tanah adalah pondasi pendukung suatu bangunan atau bahan konstruksi dari bangunan itu sendiri seperti tanggul atau bendungan, seperti tembok/dinding penahan tanah. Jadi tanah itu selalu berperan pada setiap pekerjaan teknik sipil.

Sebagian besar tanah di Indonesia terdiri dari tanah lempung. Tanah jenis ini, pada umumnya mengandung mineral yang mempunyai potensi swelling (pengembangan) yang tinggi, dan dapat disebut tanah ekspansif. Selain itu tanah jenis ini memiliki sensitivitas yang sangat tinggi terhadap perubahan kadar air yang terjadi. Jadi kandungan air yang ada dalam tanah lempung sangat mempengaruhi sifat dan perilaku tanah tersebut, khususnya pada proses pengembangannya (swelling).

Partikel tanah lempung diklasifikasikan berdasarkan pada diameter efektif ($\phi < 2 \mu\text{m}$) dan perlu melihat mineral yang terkandung didalamnya. Untuk tanah lempung ekspansif, kandungan mineralnya sebagian besar adalah montmorillonite yang mempunyai luas permukaan lebih besar dan sangat mudah menyerap air dalam jumlah besar bila dibandingkan dengan mineral lainnya, sehingga tanah mempunyai kepekaan terhadap perubahan kadar air dan sangat mudah mengembang.

Pada musim hujan, air permukaan dapat merembes masuk kedalam tanah dan mengakibatkan kadar air meningkat. selanjutnya tekanan akibat pengembangan tanah lempung akan mendesak struktur bangunan di atasnya (gedung, perkerasan jalan raya, saluran air dan fasilitas lainnya) sampai menjadi cembung sehingga menimbulkan kerusakan pada struktur bangunan. Sebaliknya pada musim kemarau, apabila kadar air tanah turun sampai melampaui batas susutnya, maka akan menimbulkan penurunan yang tidak merata pada struktur bangunan dan juga akan terjadi retak-retak pada struktur bangunan.

TINJAUAN PUSTAKA

Tanah lempung adalah kumpulan partikel mineral yang mempunyai indeks plastisitas sesuai dengan batas atterberg yang pada waktu mengering membentuk suatu massa yang bersatu sedemikian rupa sehingga diperlukan

gaya untuk memisahkan setiap butiran mikroskopisnya. Campuran yang diperlukan untuk membuat suatu deposit tanah menjadi bersifat kohesif adalah mineral lempung, Besarnya kohesi tergantung pada ukuran relatif dan jumlah berbagai butiran tanah dan mineral lempung yang ada. Bila deposit mengandung lebih dari 50 persen partikel-partikel berukuran 0,002 atau lebih kecil, deposit tersebut disebut lempung. Dengan persentasi relatif ini, partikel-partikel tanah yang lebih besar akan terlarut dalam matriks tanah berbutir halus, bila 80 sampai 90 persen dari bahan deposit tersebut lebih kecil dari saringan No.200 (0,075 mm), cukup 5 sampai 10 persen lempung yang ada telah menyebabkan tanah tersebut bersifat lempung.

Tanah lempung sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis (tidak dapat dilihat dengan jelas bila hanya dengan mikroskop biasa) yang berbentuk lempengan-lempengan pipih dan merupakan partikel-partikel dari mika, mineral-mineral lempung, dan mineral-mineral yang sangat halus lain. Lempung didefinisikan sebagai golongan partikel yang berukuran kurang dari 0,002 mm ($2 \mu\text{m}$) tetapi pada beberapa kasus, partikel berukuran antara 0,002 mm sampai 0,005 mm juga masih digolongkan sebagai partikel lempung. Dari segi mineral (bukan ukurannya) yang disebut tanah lempung (dan mineral lempung) ialah yang mempunyai partikel-partikel tertentu yang menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah bila dicampur dengan air (Grim, 1953). Jadi dari segi mineral, tanah dapat juga disebut sebagai tanah bukan lempung (non-clay soils) meskipun terdiri dari partikel-partikel yang sangat halus (partikel-partikel quartz, feldspar dan mika dapat berukuran submikroskopis, tetapi umumnya mereka tidak dapat menyebabkan terjadinya sifat plastis dari tanah). Dari segi ukuran, akan lebih tepat bila partikel-partikel tanah yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm atau lebih kecil dari 0,005 mm menurut sistem klasifikasi yang lain, disebut saja sebagai partikel berukuran lempung daripada disebut sebagai lempung saja.

Mineral Lempung

Mineral-mineral lempung terutama terdiri dari silikat aluminium dan/atau besi dan magnesium. Beberapa diantaranya juga

mengandung alkali atau tanah alkalin sebagai komponen dasarnya mineral-mineral ini terutama terdiri dari kristalin dimana atom-atom yang membentuknya tersusun dalam suatu pola geometrik tertentu. Sebagian besar mineral lempung mempunyai struktur berlapis. Beberapa diantaranya mempunyai bentuk silinder memanjang atau struktur berserat. Massa tanah biasanya mengandung campuran beberapa mineral lempung yang diberi nama sesuai dengan mineral lempung yang terbanyak dengan berbagai jumlah mineral bukan lempung lainnya.

Satuan oktahedron disebut brucit (*brucite*) apabila atom logamnya adalah magnesium dan disebut gipsit (*gibbsite*) apabila atom logamnya adalah aluminium. Semua kombinasi mungkin dari satuan-satuan dasar ini dalam membentuk mineral lempung akan menghasilkan muatan negatif netto pada permukaan luar. Maka larutan tanah dan air akan mempunyai sifat reaksi alkalin ($\text{pH} > 7$), kecuali tanah tersebut terkontaminasi dengan substansi asam.

Sumber utama dari mineral lempung adalah pelapukan kimiawi dari batuan yang mengandung: Felspar ortoklas, Felspar plagoklas dan mika (muskovit) yang semuanya dapat disebut silikat aluminium kompleks. Tetapi menurut Grim (1968), mineral lempung dapat terbentuk dari hampir setiap batuan selama terdapat cukup banyak alkali dan tanah alkalin untuk dapat membuat terjadinya reaksi kimia.

Pelapukan pada batuan menghasilkan sejumlah besar mineral lempung dengan sifat-sifat daya gabung (*affinity*) yang sama terhadap air, tetapi dalam jumlah yang sangat berbeda. Beberapa mineral lempung yang biasa terdapat adalah sebagai berikut :

Kaolinit (kaolinite)

Satuan struktur kaolinit terdiri dari lapisan tetrahedra silika yang berganti-ganti dengan puncak yang tertanam didalam satuan oktahedral alumina (*gibbsite*). Satuan dasar tipis yang dihasilkan mempunyai ketebalan sekitar 7 Å dan memanjang secara tak terhingga ke arah kedua dimensi lainnya. Cluster kaolinit merupakan tumpukan dari 70 sampai 100 atau lebih lembar-lembar 7 Å ini, sebagai suatu buku dengan rekatan hidrogen dan gaya Van der Waals pada pertemuannya.

Kombinasi rekatan hidrogen dan gaya Van der Waals menghasilkan kekuatan dan stabilitas yang cukup besar dengan antar lapisannya sedikit cenderung menghisap air dan mengembang (disebut aktif*), yang dapat menyebabkan buku mineral ini menjadi setebal 500 sampai 1000 Å. Kaolinit adalah mineral lempung paling tidak aktif yang pernah diamati. Kaolinit dapat dihasilkan oleh pelapukan beberapa mineral lempung yang lebih aktif atau dapat juga terbentuk langsung dari produk sampingan pelapukan batuan.

Mineral 1: 1 lainnya dari “ keluarga “ kaolinit adalah haloisit (*halloysite*). Haloisit berbeda dari kaolinit karena tertumpuk secara lebih acak, sehingga satu molekul air dapat masuk diantara satuan-satuan 7 Å. Haloisit juga berbeda dari kaolinit karena lembaran-lembaran elemennya tergulung menjadi suatu silinder. Dehidrasi akibat panas sebesar 60 sampai 70°C, dan bahkan penyingkapan udara, sering dapat merubah haloisit ini secara permanen, sehingga berubah menjadi 2H₂O atau sana sekali meniadakan molekul air sehingga berubah menjadi kaolinit. Sifat-sifat teknis dari haloisit sangat berbeda jika dibandingkan dengan kaolinit, dan karena pengeringan udara dapat mempengaruhi reaksi-reaksi kimia yang secara tidak langsung diukur dengan batas Atterberg. Kaolinit biasanya terdapat didaerah-daerah dengan curah hujan tinggi seperti di tenggara Amerika Serikat, Cina, sebagian Eropa, dan tempat-tempat lainnya.

Illit (Illite)

Mineral lempung illit terdiri lapisan gipsit oktahedral yang terletak di antara dua lapisan silika tetrahedral. Ini menghasilkan mineral 1:2 dengan tambahan perbedaan dimana beberapa posisi silika akan terisi oleh atom-atom aluminium, dan ion-ion potasium ikut berada di antara lapisan-lapisan untuk mengatasi kekurangan muatan. Rekatan seperti ini menyebabkan kondisi yang kurang stabil jika dibandingkan dengan kaolinit, dan karena itu aktivitas illit adalah lebih besar.

Vermikulit merupakan mineral lempung dalam keluarga illit yang bersifat sama, kecuali molekul air lapisan-ganda diantara lapisan-lapisannya diselang-selingi dengan ion-ion kalsium dan/atau magnesium, dengan substitusi

oleh brusit sebagai pengganti gipsit didalam lapisan oktahedralnya.

Lempung illit dan vermikulit serta serpih lempung banyak dipakai untuk membuat agregat berbobot ringan (kadang-kadang disebut "serpih mengembang" atau 'vermikulit'). Vermikulit terutama sangat mengembang apabila mengalami pemanasan yang tinggi, karena lapisan-lapisan airnya dengan cepat berubah menjadi uap sehingga mengakibatkan terjadinya pengembangan yang besar.

Lempung illit biasanya dijumpai pada daerah-daerah dengan curah hujan sedang seperti dibagian tengah Amerika Serikat, Inggris, dan Eropa.

Montmorilonit (Montmorillonite)

Mineral lempung montmorilonit juga terdiri dari lapisan-lapisan dengan satuan 1 : 2. Rekatan antar lapisan terutama diakibatkan oleh gaya Van der Waals, dan karena itu sangat lemah jika dibandingkan dengan rekatan hidrogen atau rekatan ion lainnya. Berbagai substitusi terjadi, antara lain Al untuk Si dalam lapisan tetrahedral dan Mg, Fe, Li, atau Zn, untuk Al dalam lapisan oktahedral. Perubahan-perubahan ini mengakibatkan terjadinya muatan negatif netto yang relatif sangat tidak seimbang pada mineral, dimana terjadi perubahan kation yang besar dalam kapasitas dan tarikan terhadap air dengan ion-ion H karena tidak terdapatnya ion-ion logam.

Bentonit (Bentonite) adalah lempung montmorilonit yang dijumpai didalam deposit vulkanik yang telah mengalami pelapukan sebagian di Wyoming, Swiss, dan Selandia Baru. Mineral lempung ini terutama sangat aktif dalam mengembang apabila terdapat air dan sangat banyak digunakan dalam pemboran sumur-sumur minyak dan dalam eksplorasi tanah sebagai suatu lumpur untuk pemboran dan sebagai suatu penutup (grout) dari lempung. Sifat-sifat bentonit bervariasi, tergantung pada sumber dan jumlah pelapukan material vulkanik induknya.

Pelapukan mineral lempung montmorilonit sering menghasilkan lempung kaolinit, dan didaerah dimana telah terjadi pelapukan, kedua mineral tersebut biasanya dapat diperoleh. Montmorilonit ditemukan didaerah-daerah kering di dunia ini, seperti di

bagian barat Amerika Serikat, Australia, Selandia Baru, dan di Selatan Afrika.

Kerusakan bangunan (retaknya dinding, terangkatnya pondasi, jalan bergelombang) oleh sementara orang sering dipandang secara fisik luar saja, tetapi sebenarnya permasalahan ini sering timbul karena permasalahan yang ada pada tanah. Permasalahan tanah ini tidak hanya terbatas pada penurunan (settlement) nya saja, tetapi mencakup secara menyeluruh, seperti adanya penyusutan-pengembangan tanah.

Pembahasan dan penelitian tentang perilaku tanah lempung ekspansif yang mempunyai sifat swelling sangat penting, oleh karena itu perlu ditinjau yang dapat digunakan untuk menjelaskan tentang sifat-sifat fisik dan sifat mekanik khususnya tanah ekspansif. Dan untuk mengetahui tingkat pengembangan (ekspansivitas) tanah, perlu dilakukan penelitian di laboratorium, seperti uji Indeks properties, compaction dan swelling test.

Penelitian bertujuan untuk mencari besarnya tingkat pengembangan tanah lempung ekspansif dan juga untuk mengetahui pengaruh variasi kadar air terhadap karakteristik swelling serta hubungannya dengan indeks plastisitas.

METODE PENELITIAN

Metode yang dipergunakan adalah uji laboratorium (penelitian) yang meliputi dua tahapan pekerjaan, yaitu:

1. Tahap penelitian dan pengumpulan data

Pada tahap yang pertama ini perlu dilakukan pengumpulan referensi yang mendukung dan berkaitan dengan masalah yang akan diteliti sehingga akan membantu kelancaran penelitian yang akan dilakukan. Kemudian sampel yang akan diteliti, dalam hal ini adalah Bentonit dipersiapkan sejumlah yang diperlukan dengan jenis test yang akan dilakukan.

A. Material / Sampel

- Penyediaan tanah lempung ekspansif (dalam percobaan menggunakan Bentonite).
- Penyediaan air

B. Alat

Semua pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Sumatra Utara dengan memanfaatkan peralatan yang ada di Laboratorium tersebut.

C. Pengujian yang dilakukan

1. Pengujian awal (trial test)
2. Pengujian Atterberg limit
3. Pengujian kadar air
4. Pengujian spesifik gravity
5. Pengujian compaction
6. Pengukuran swelling
7. CBR Test

2. Tahap menganalisa data dan kesimpulan.

Data yang diperoleh dari percobaan (pengujian) akan dianalisa untuk mengetahui besarnya tingkat pengembangan dari tiap-tiap sampel. Data akan disajikan dalam bentuk grafik.

Percobaan Laboratorium

Program kerja penelitian

Kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini dimulai dari kegiatan pengadaan bahan percobaan, persiapan pengujian, lalu kegiatan pengujian di Laboratorium Mekanika Tanah USU dan menganalisa hasil penelitian.

Kegiatan persiapan pengujian meliputi kegiatan persiapan bahan percobaan dan persiapan peralatan uji sifat fisik, peralatan swell, peralatan uji pemadatan dan CBR test. Kegiatan pengujian di laboratorium yang akan dilaksanakan meliputi pengujian sifat fisik tanah yang bertujuan untuk mengetahui Indeks propertis dari tanah yang uji serta pengujian swelling test untuk mengetahui karakteristik swelling dari bahan yang diuji.

Pada penelitian ini bahan percobaan yang digunakan sebagai sampel adalah lempung bentonit. Adapun alasan pemilihan lempung bentonit sebagai bahan percobaan adalah karena kandungan mineral dari bentonit sebagian besar adalah montmorilonit, mineral ini merupakan mineral yang paling bersifat ekspansif. Sehingga diharapkan sifat dari bentonit dapat merepresentasikan sifat tanah lempung. Selain itu bentonit dapat diperoleh dipasaran sehingga mudah ekspansif mendapatkannya serta sifat dan karakteristiknya dapat lebih konstan.

Swelling dan CBR test

California Bearing Ratio (CBR) adalah perbandingan antara beban penetrasi suatu bahan terhadap bahan standar dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Nilai CBR ini digunakan untuk menilai kekuatan tanah dasar yang akan digunakan untuk perkerasan. Nilai CBR ini juga dipakai

sebagai dasar untuk penentuan tebal lapisan perkerasan.

Pada penelitian ini digunakan percobaan CBR terendam, dan selama masa perendaman test swelling dilakukan, yaitu mengukur tingkat pengembangan dari masing-masing sampel. Tingkat pengembangan (swelling) sangat tergantung pada kadar air mula-mula sampel. Maka untuk mengetahui pengaruh variasi kadar air mula-mula dari sampel terhadap tingkat pengembangan, pada percobaan ini kadar air mula-mula sampel dibedakan atas :

- a. Kadar air sisi kering optimum (dry side of optimum) yaitu kadar air yang kurang dari kadar air optimumnya.
- b. Kadar air optimum (optimum moisture content) yaitu kadar air sampel pada saat tercapai berat volume kering maksimum (yd maks) yang diperoleh dari percobaan pemadatan.
- c. Kadar air sisi basah optimum (wet side of optimum) yaitu kadar air sampel yang lebih tinggi dari kadar air optimumnya.

Pada percobaan swelling test ini digunakan beberapa variasi kadar air yaitu $W_{opt}-10\%$, W_{opt} , $W_{opt}+10\%$ yang masing-masing mewakili dari kondisi dry side of optimum, optimum moisture content dan wet side of optimum. Pembacaan pengembangan dilakukan sampai tercapai pembacaan yang konstan baru kemudian dilakukan percobaan CBR.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Fisik Lempung Bentonite

Pengujian sifat fisik dilakukan untuk melengkapi data dari sampel Bentonite yang dipergunakan sebagai bahan percobaan dalam menganalisa karakteristik swelling lempung ekspansif. Pengujian sifat fisik dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah FT USU, sesuai dengan standard ASTM. Hasil uji laboratorium tersebut merupakan nilai rata-rata dari beberapa percobaan yang dilakukan.

Karakteristik Swelling Lempung Ekspansif

Pada penelitian ini sampel yang digunakan adalah Bentonite yang mempunyai sifat ekspansif, jadi faktor kandungan dan jenis mineral lempungnya adalah konstan. Sedangkan faktor kadar air awal dan kepadatan dapat divariasikan. Dengan menganggap salah satu dari dua variabel (kadar air dan kepadatan)

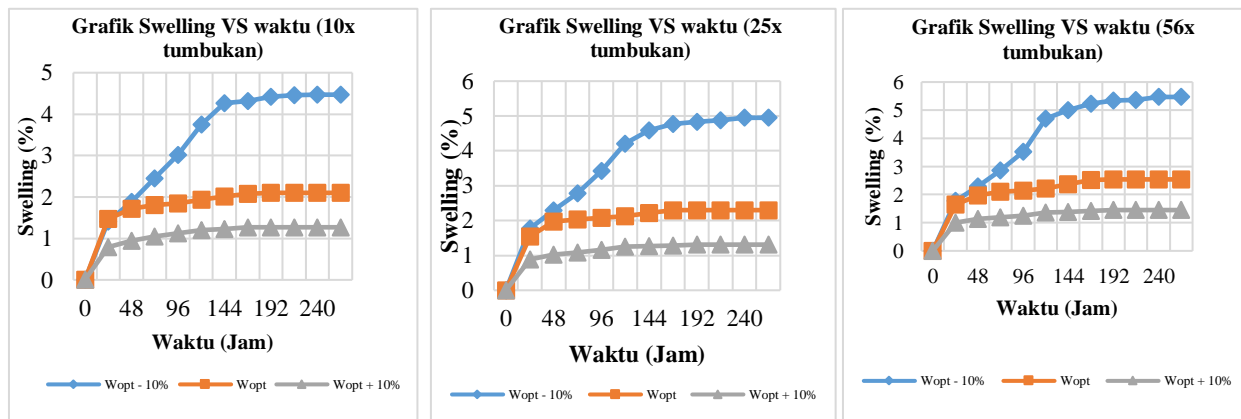
menjadi suatu nilai yang konstan maka dibuat hubungan antara nilai Swelling terhadap waktu pada kondisi tertentu dan disajikan dalam bentuk grafik.

Dari Gambar 1 dan 2 terlihat bahwa pada kondisi pemadatan yang sama dan kadar air awal yang berbeda-beda terdapat perbedaan tingkat swelling yang relatif besar antara kondisi sampel pada kadar air awal dibawah kadar air optimum (dry side of optimum), pada kadar air optimum dan pada kadar air dibawah optimum (wet side of optimum).

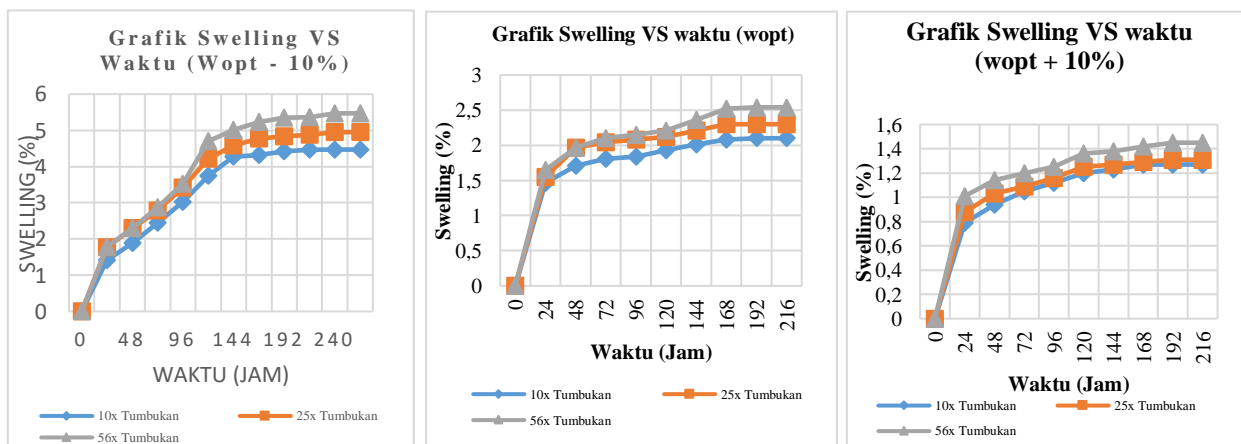
Sedangkan pada kondisi kadar air awal yang sama dan pemadatan yang berbeda-beda terlihat perbedaan tingkat swelling yang relatif kecil antara kondisi sampel yang dipadatkan dengan 10x tumbukan, 25x tumbukan dan 56x tumbukan. Hal ini menunjukkan bahwa jika

dibandingkan dengan faktor kepadatan, kadar air awal sampel merupakan faktor yang lebih mempengaruhi tingkat swelling tanah lempung ekspansif.

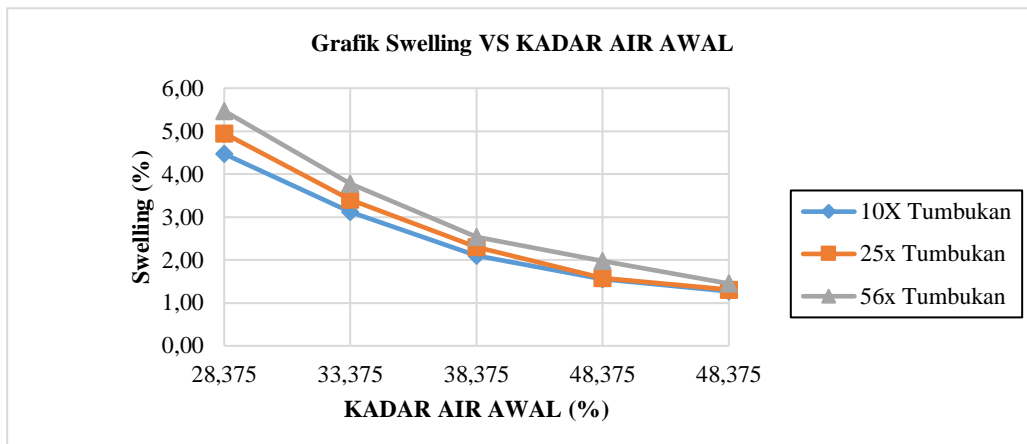
Dari kedua faktor yang mempengaruhi tingkat swelling tanah ekspansif yaitu kepadatan dan kadar air awal sampel terlihat bahwa tingkat swelling yang paling besar akan terjadi pada kadar air dibawah optimum (dry side optimum) dan pada tingkat pemadatan yang paling besar (56x tumbukan). Untuk mengetahui hubungan antara kadar air awal dan tingkat swelling yang paling besar maka dibuat grafik hubungan antara swelling dan kadar air awal pada tingkat pemadatan yang paling besar (56x pukulan), seperti diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 1. Grafik Swelling VS Waktu Pada Kondisi Pemadatan Awal Sama



Gambar 2 Grafik Swelling VS Waktu Pada Kondisi Kadar Air Awal Sama



Gambar 3 Grafik Hubungan Antara Swelling Dan Kadar Air Awal Pada Tingkat Pemadatan Yang Berbeda-Beda

KESIMPULAN

1. Tingkat pengembangan pada tanah ekspansif sangat dipengaruhi oleh besarnya kadar air awal (Natural Moisture Content).
2. Tingkat pengembangan yang besar akan terjadi pada saat kadar air optimumnya belum tercapai. Sedangkan pada saat kadar airnya telah melebihi nilai kadar air optimum (wet side of optimum), potensi pengembangannya akan mengecil.
3. Tingkat pengembangan pada tanah ekspansif juga dipengaruhi kepadatan tanah. Tanah yang memiliki kepadatan yang lebih besar akan memiliki potensi pengembangan yang lebih besar jika dibandingkan dengan tanah yang memiliki tingkat kepadatan yang relatif kecil pada kadar air awal yang sama.
4. Indeks Plastisitas dapat digunakan untuk memprediksi karakteristik swelling tanah ekspansif dimana tanah ekspansif yang mempunyai Indeks Plastisitas yang tinggi akan mempunyai kecenderungan mengembang yang besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J.E., 1991. Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah. Edisi kedua. Erlangga. Jakarta.
- Das, B. M., 1991. Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis). Jilid 1, Erlangga. Jakarta.
- Ayu, M., Rahman, F., Karim, M.A., Mallombasi, A., Aminuddin, M., 2019. Hubungan Koefisien Rembes dengan Swelling terhadap Variasi Butir Tanah pada Kondisi Padat. Jurnal ilmiah mahasiswa teknik sipil universitas muslim Indonesia. Volume 1 nomor 1 Januari 2019.
- Wijanarko, S.A., Setiawan, B., Djarwanti, N 2019. Pengaruh Penambahan Kolom Tanah Semen Terhadap Perpindahan Vertikal Tanah Dasar Ekspansif Saat Kondisi Mengembang. Jurnal Matriks Teknik Sipil 2019.
- Marcal, P.J., Sudjianto, A.T., Aditya, C., 2022. Stabilisasi Swelling Tiga Dimensi (3D) Tanah Lempung Ekspansif Dengan Limbah Industri Kerajinan Marmer. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, BOWPLANK. Vol 2 No. 1 April 2022.
- Landangkasiang, F.N., Sompie, O.B.A., Sumampouw, J.E.R., 2020. Analisis Geoteknik Tanah Lempung Terhadap Penambahan Limbah Gypsum. Jurnal Sipil Statik Vol 8 No. 2. Pebruari 2020.
- Sipangkar, S.O., Peslinof, M., Fendriani, Y., 2023. Analisis Sifat Fisis Tanah Pada Stabilitas Tanah Lempung Dengan Penambahan Kapur Tohor (CAO). Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika vol 7 No. 1 2023.
- Hangge, E.E., Bella, R.A., Ullu, M.C., 2021. Pemanfaatan Fly Ash Untuk Stabilisasi Tanah Dasar Lempung Ekspansif. Jurnal Teknik Sipil, vol 1, April 2021.
- Sabardiansyah, R., Gusrizal, Sulaiman AR. 2022. Stabilisasi Tanah Lempung

Ekspansif Menggunakan Fly Ash Dan Abu Bata Terhadap Nilai California Bearing Ratio. Jurnal Sipil Sains Terapan vol. 05 No. 01. 2022.

Munirwan, R.A., 2023. Potensi Penambahan Pasir Bentonit Pada Tanah Lempung Untuk Stabilisasi Tanah. Jurnal PRINCE vol. 2. No. 3. 2023.