

PENGARUH KADAR AIR, WAKTU, DAN KEPADATAN TANAH URUG EKSPANSIF TERHADAP FRIKSI TIANG

Darwin Hughie¹, Christien Halim², Gogot Setyo Budi³, dan Daniel Tjandra⁴

ABSTRAK : Penelitian ini mempelajari pengaruh kadar air, waktu, dan kepadatan tanah ekspansif terhadap friksi tiang. Model tiang yang digunakan terbuat dari baja berukuran 1 cm dan tinggi 30 cm. Variasi kepadatan tanah adalah 56 tumbukan, 40 tumbukan, dan 25 tumbukan sesuai standar Proctor (AASHTO-T99-74). Pengujian yang dilakukan meliputi pengaruh kadar air, waktu, dan kepadatan tanah terhadap friksi tiang, disamping itu juga dilakukan tes untuk mengetahui pengaruh kepadatan terhadap penyerapan, dan pengembangan yang terjadi di tanah ekspansif pada masing-masing kepadatan. Hasil dari tes menunjukkan bahwa tingkat kepadatan yang lebih tinggi menyebabkan nilai friksi yang lebih besar. Sedangkan untuk variasi kadar air, ditemukan bahwa kadar air dengan penambahan 5% dari OMC menghasilkan nilai friksi yang lebih besar dibandingkan dengan kadar air optimum (OMC). Dari segi waktu, adanya peningkatan nilai friksi seiring berjalannya waktu ditunjukkan oleh sampel dengan *wetting* 5% (untuk semua tingkat kepadatan). Sedangkan untuk tes pengaruh kepadatan tanah terhadap penyerapan air didapatkan hasil bahwa penyerapan semakin kecil dengan bertambahnya kepadatan tanah, begitupula sebaliknya.

KATA KUNCI : tanah ekspansif, pemadatan tanah, *swelling*, friksi tiang

1. PENDAHULUAN

Populasi yang terus bertambah menuntut peningkatan pembangunan di kota Surabaya. Tanah sebagai material dasar penting harus diperhatikan saat proses pembangunan sebab semua beban dan gaya dari bangunan diterima oleh tanah melalui pondasi (Lestari, 2014). Surabaya Barat dengan karakteristik tanah lempung ekspansif membutuhkan perhatian dan perhitungan yang baik atas bangunan di atasnya (Wibisono & Hendarlim, 2002). Banyak negara telah melaporkan efek destruktif dari jenis tanah ini (Zhan, L.T. *et al*, 2003). Contoh permasalahan yang ditimbulkan antara lain yaitu *Swelling*, *Softening*, dan *Shrinkage* pada tanah. Secara garis besar, *Shrinkage* merupakan kondisi dimana kadar air dalam tanah berkurang sedangkan *Swelling* dan *Softening* merupakan kondisi dimana kadar air dalam tanah bertambah.

Dalam penelitian yang dilakukan Budi (2017) ditemukan bahwa faktor utama terjadinya penurunan yang tidak seragam terhadap perumahan serta kerusakan seperti dinding retak adalah *softening soil* disamping *swelling*. Faktor lain penyebab kerusakan ini ialah pemadatan tanah urug yang tidak sempurna sehingga permeabilitas tanah kurang diteliti sampai terjadi kegagalan seperti ini. Oleh sebab itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh tingkat kepadatan tanah, variasi kadar air, dan waktu terhadap friksi tiang. Diharapkan penelitian ini bisa diaplikasikan untuk tanah ekspansif yang digunakan sebagai urugan.

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21414004@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21414135@john.petra.ac.id

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, gogot@peter.petra.ac.id

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, danieljtj@peter.petra.ac.id

2. LANDASAN TEORI

2.1. Umum

Kerusakan dari tanah ekspansif berhubungan erat dengan interaksi antara tanah dengan air (*strong soil-water interaction*) pada lapisan tanah dangkal dalam siklus pembasahan-pengeringan (*wetting-drying cycles*) (Badawi & Indarto, 2010). Selama musim kemarau terjadi evapotranspirasi yang menyebabkan volume tanah berkurang karena kehilangan kadar dan berujung pada penyusutan (*shrinkage*). Kebalikannya; selama musim penghujan, infiltrasi dari curah hujan menyebabkan volume tanah bertambah karena adanya peningkatan kadar air dan berujung pada pembengkakan (*swelling*) tanah ekspansif dan berkurangnya kekuatan tanah dalam menahan geser (*shear strength*). Selain *swelling*, kerusakan yang terjadi saat kondisi tanah jenuh adalah *softening*. Zhan (2013) menyatakan bahwa saat kadar air meningkat dalam tanah maka daya hisap atau daya ikat (*suction*) tanah akan menurun begitu halnya dengan gaya geser tanah (*shear strength*).

2.2. Pemadatan Tanah Ekspansif

2.2.1. Teori Pemadatan

Tujuan utama dari pemadatan tanah adalah mengecilkan pori dalam tanah akibat beban yang diaplikasikan pada tanah. Selain itu manfaat yang didapat dari proses pemadatan tanah adalah mempertinggi kuat geser tanah, mengurangi sifat mudah mampat (kompresibilitas), mengurangi permeabilitas, dan mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air, dll (Yuliet, Hakam, Febrian, 2011).

2.2.2. Sifat Tanah Ekspansif yang Dipadatkan dan Hubungannya terhadap Permeabilitas Tanah

Tanah asli (*natural specimen*) dan tanah yang dipadatkan (*remolded specimen*) diuji melewati proses *drying-wetting* dan terdapat kegagalan overkonsolidasi tanah pada tanah asli sedangkan tanah yang dipadatkan tidak terjadi kegagalan. Pada percobaan *Proctor*, pemadatan yang dilakukan pada tanah dengan 5 lapis menghasilkan tingkat kepadatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah dengan 3 lapis. Permeabilitas tanah dapat diminimalisir pada tanah dengan tingkat kepadatan yang lebih tinggi. (Zhan, 2013).

2.3. Pengaruh *Softening Soil* pada Friksi Tiang dan Tanah Urug

Budi (2017) menginvestigasi sumber potensial yang menyebabkan penurunan dan kerusakan pada perumahan yang dibangun di atas tanah ekspansif. Diteliti bahwa penyebab utama terjadinya kerusakan pada perumahan dan penurunan adalah *softening* selain *swelling*. Pada daerah yang rentan atau terbuka, tiang pondasi kehilangan friksi karena kehilangan *suction* saat proses *wetting*. Penyebab lain adalah pemadatan tanah urug yang tidak sempurna sehingga terjadi konsolidasi yang tidak merata.

2.4. Pengaruh Variasi Kadar Air pada Tanah Ekspansif terhadap Kapasitas Friksi Tiang

Tjandra, Indarto, dan Soemitro (2013) dalam studinya meneliti pengaruh variasi kadar air pada tanah ekspansif terhadap kapasitas friksi tiang. Zona aktif dalam tanah merupakan zona dimana tanah dapat berubah akibat proses *wetting-drying*. Saat *wetting* tanah berubah dari fase padat ke likuid akibat infiltrasi begitupun sebaliknya saat proses *drying* tanah akan berubah dari likuid ke padat akibat evaporasi. Hal tersebut berdampak besar terhadap kapasitas friksi tiang dikarenakan nilai adhesi dan kohesi tanah ikut berubah. Dengan variasi kadar air yang diaplikasikan, didapat nilai adhesi yang berbeda. Dalam studinya, tes laboratorium dilakukan dengan menggunakan tiang baja dan beton berdiameter 1cm, pipa 15.24cm, dan *Unconfined Compression Machine* untuk mencari nilai adhesi tiang. Hasil yang didapat hasil bahwa nilai adhesi tiang baja lebih besar 42% dari tiang beton. Hal tersebut bertentangan dengan teori-teori yang beredar. Selain faktor permukaan tiang, karakteristik tanah ekspansif yang berubah karena proses *wetting-drying* menjadi pemicu hasil demikian.

2.5. Analisa Pengaruh Kadar Air dan Material terhadap Kapasitas Friksi Tiang

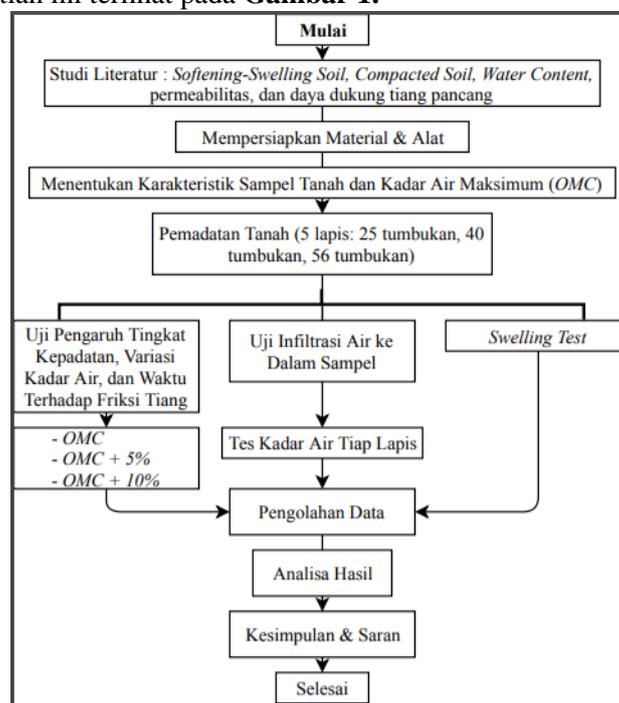
Dalam studi yang dilakukan oleh Amalia, Rohmadoniati, Soedarsono, dan Pratikso (2013) yang menggunakan sampel tanah lempung ekspansif dari kota Purwodadi, Jawa Timur, ditemukan bahwa

tingkat kejenuhan tanah dan perbedaan material dari model tiang berpengaruh terhadap daya pikul tiang tersebut. Dengan menggunakan 2 material model tiang yaitu baja dan beton, ditemukan adanya perbedaan yang signifikan terhadap daya pikul tiang dari 2 material yang berbeda tersebut. Saat tanah dengan kondisi tidak jenuh maka tiang beton mampu memikul beban berat namun saat kondisi tanah tidak jenuh tiang beton kehilangan daya pikulnya. Sedangkan untuk tiang baja, daya pikul maksimum didapat saat kondisi tanah jenuh, dan saat kondisi tanah tidak jenuh tiang baja kehilangan daya pikulnya. Adapun kondisi seperti ini terjadi karena material baja yang memiliki campuran logam besi akan teroksidasi saat terkena air dan berujung pada meningkatnya daya hisap (*suction*) pada tanah sehingga daya pikul dari tiang baja bisa lebih besar saat kondisi tanah jenuh.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Kerangka Penelitian

Pengujian dibagi menjadi 3; uji pengaruh tingkat kepadatan, variasi kadar air, dan waktu terhadap friksi tiang, uji pengaruh kepadatan tanah terhadap permeabilitas, dan uji pengaruh kepadatan terhadap *swelling*. Rincian penelitian ini terlihat pada **Gambar 1**.



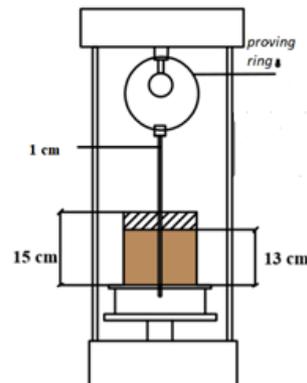
Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Untuk semua macam pengujian, tiga (3) variasi kepadatan tanah yaitu 25 kali tumbukan per lapis, 40 kali tumbukan per lapis, dan 56 kali tumbukan per lapis dilaksanakan dalam penelitian ini. Standar penumbukan diambil dari AASHTO-T99-74. Jumlah lapisan tanah per sampel adalah 5 lapis (5 layers) dengan tinggi per lapisan 2-3 cm. Seluruh pengerjaan dalam penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Kristen Petra Surabaya.

Analisa sampel awal dimulai dengan mencari karakteristik sampel tanah yang diambil dari Citraland Surabaya. Setelah itu dilakukan analisa untuk mencapai nilai kadar air optimum (OMC). Setelah ditemukan nilai kadar air optimum (OMC), nilai kadar air optimum (OMC) tersebut digunakan pada pengujian friksi tiang, pengujian infiltrasi air, dan pengujian *swelling*.

3.2. Uji Pengaruh Tingkat Kepadatan Tanah, Variasi Kadar Air, dan Waktu terhadap Friksi Tiang

Pada pengujian ini, langkah pertama yang dilakukan setelah persiapan sampel tanah adalah memadatkan sampel tanah pada *PVC* yang sudah disiapkan. Sebelum tanah dipadatkan, tanah dicampur dengan air sesuai dengan kadar air optimum (OMC) yang telah didapat sebelumnya kemudian dilanjutkan dengan prosedur pemadatan menggunakan *Proctor*. Setelah dipadatkan dengan tingkat kepadatan 25 tumbukan, 40 tumbukan dan 56 tumbukan, tanah kemudian dicampur dengan kadar air optimum, kemudian diujikan pada *Unconfined Compression Machine* seperti terlihat pada **Gambar 2**.

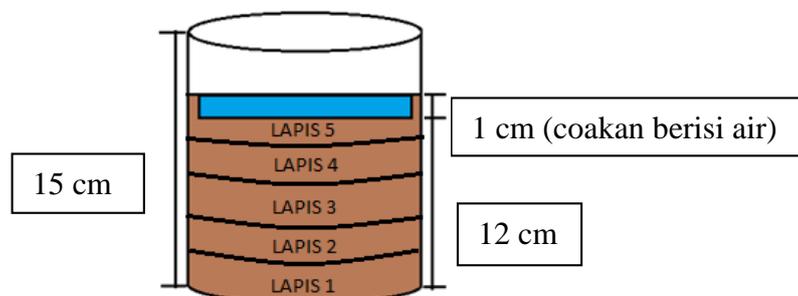


Gambar 2. Ilustrasi Pengujian Tingkat Kepadatan Tanah, Variasi Kadar Air, dan Waktu terhadap Friksi Tiang

Tiang dipenetrasikan kedalam sampel tanah setinggi 13cm untuk diketahui friksi tiangnya. Variasi kadar air antara lain kadar air optimum (OMC), *wetting 5%* (OMC + 5%), dan *wetting 10%* (OMC + 10%). Lalu setiap sampel tanah diuji dalam periode waktu 3 hari, 7 hari, dan 14 hari untuk dicari friksi tiangnya (sampel yang sama). Setiap setelah dilakukan uji friksi, sampel tanah yang sama dibungkus dengan kresek hitam agar kelembaban dan kadar airnya terjaga sampai diuji pada periode berikutnya.

3.3. Uji Infiltrasi Air ke Dalam Sampel

Langkah awal pengerjaan di pengujian ini sama seperti pengujian sebelumnya, yaitu tanah dicampur dengan kadar air optimum (OMC) kemudian dipadatkan pada *PVC* yang telah disediakan menggunakan *Proctor*. Sama seperti pengujian sebelumnya, pada pengujian ini tinggi total tanah dari dasar *PVC* adalah 13 cm. Jumlah lapisan per sampel dalam pengujian ini adalah 5 lapis. Dalam pengujian ini, semua sampel memakai satu (1) variasi kadar air yaitu *OMC*. Ilustrasi permodelan pengujian ini di laboratorium terlihat pada **Gambar 3**.

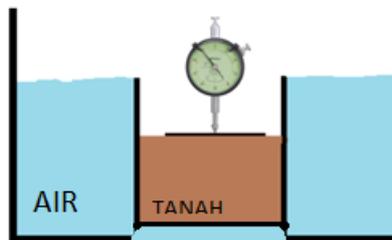


Gambar 3. Ilustrasi Pengujian Infiltrasi Air ke Dalam Sampel

Setelah langkah awal dilakukan seperti pengujian sebelumnya, sampel tanah yang telah dipadatkan sesuai tingkat kepadatan masing-masing, lapisan teratas sampel dicoaki sedalam 1-2 cm kemudian dituang air. Lalu sampel didiamkan selama 3-4 jam mempertimbangkan air terserap secara homogen lalu dianalisa pengaruh kepadatan tanah terhadap permeabilitasnya dengan menguji kadar air pada tiap lapisan sampel tanah.

3.4. Swelling Test

Langkah awal yang dilakukan adalah memadatkan tanah pada PVC yang telah disiapkan sesuai dengan tingkat kepadatan 25 tumbukan, 40 tumbukan, dan 56 tumbukan. Tinggi tanah total dari dasar PVC adalah 13 cm. Kemudian PVC diletakkan dalam wadah yang lebih besar yang setelah itu dituang air di sekeliling luar PVC sampai pada ketinggian 15 cm atau setinggi PVC. Diatas tanah lapisan paling atas, diberi lempengan persegi terbuat dari akrilik yang rata dan ringan ukuran 6x6 cm². Ini digunakan agar dial gauge dapat membaca besar swelling yang terjadi diukur dari kenaikan lempengan tersebut. Sampel dibiarkan selama 24 jam untuk di uji. Ilustrasi pengujian dapat dilihat pada **Gambar 4**.



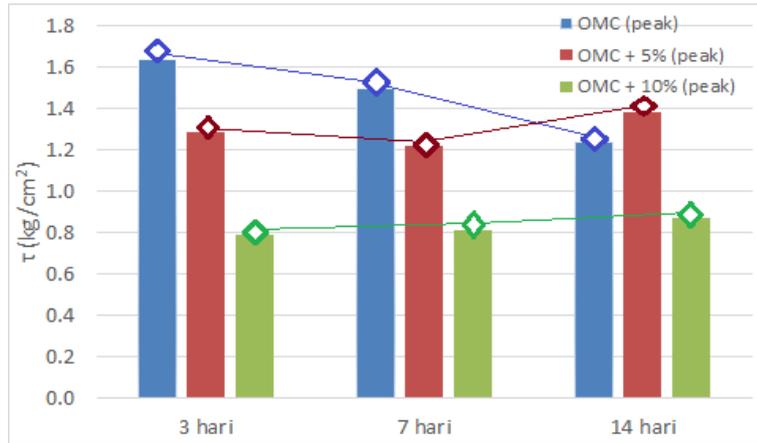
Gambar 4. Ilustrasi Pengujian Swelling Test

4. HASIL DAN ANALISIS

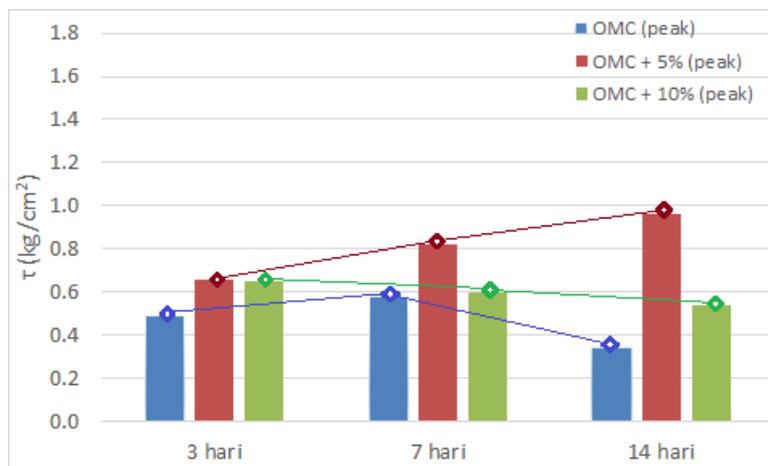
4.1. Hasil Uji Pengaruh Tingkat Kepadatan Tanah, Variasi Kadar Air, dan Waktu terhadap Friksi Tiang

Kadar air optimum yang diperoleh pada penelitian ini adalah 14% dan berat jenis kering adalah 1.49 gr/cm³. **Gambar 5** menunjukkan perubahan nilai friksi tiang yang signifikan dari waktu pengujian 3 hari, 7 hari, dan 14 hari dengan tingkat kepadatan 56 tumbukan. Hasil menunjukkan nilai friksi tiang dengan tingkat kepadatan 56 tumbukan saat kondisi kadar air optimum (*OMC*) bergerak menurun seiring berjalannya waktu, penurunan yang terjadi secara keseluruhan adalah sebesar 13%. Hal ini menunjukkan bahwa daya hisap tanah (*suction*) menurun dan tidak sebesar saat awal pembuatan sampel karena porositas dalam tanah yang terjadi akibat proses *set up & freeze* tidak teratasi dengan baik saat kondisi kadar air optimum (*OMC*). Sedangkan untuk kondisi kadar air dengan *wetting* 5% dan *wetting* 10% nilai friksi tiang cenderung naik seiring dengan bertambahnya waktu. Kondisi ini didukung oleh fakta bahwa material baja dengan campuran logam besi bereaksi sehingga terjadi oksidasi yang menyebabkan membesarnya nilai friksi yang didapat. Dengan adanya siklus pembasahan (*wetting*), porositas tanah yang terjadi selama proses *set up & freeze* terisi dengan bantuan air dari siklus pembasahan tersebut.

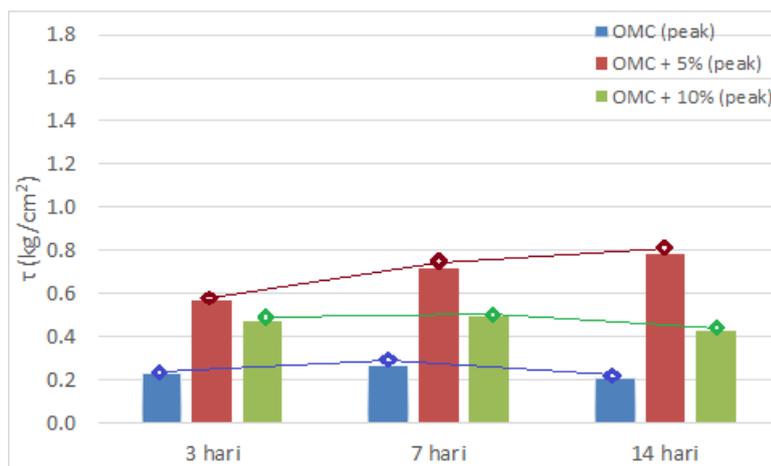
Perilaku serupa juga ditunjukkan dalam hasil pengujian dengan tingkat kepadatan 40 tumbukan seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 6**. Namun untuk kondisi kadar air optimum (*OMC*) dan *wetting* 10% (*OMC* + 10%) nilai friksi yang didapat cenderung tidak stabil seiring dengan berjalannya waktu. Secara keseluruhan terjadi penurunan nilai friksi tiang sebesar 8.8% untuk kondisi kadar air *wetting* 10%. Sedangkan untuk kondisi kadar air dengan *wetting* 5% (*OMC* + 5%) diperoleh hasil yang stabil kenaikannya seiring dengan berjalannya waktu, secara keseluruhan peningkatan nilai friksi yang terjadi sebesar 20%.



Gambar 5. Pengaruh Waktu terhadap Friksi Tiang dengan Tingkat Keapatan 56 Tumbukan



Gambar 6. Pengaruh Waktu terhadap Friksi Tiang dengan Tingkat Keapatan 40 Tumbukan



Gambar 7. Pengaruh Waktu terhadap Friksi Tiang dengan Tingkat Keapatan 25 Tumbukan

Dari hasil yang diperoleh dari **Gambar 5-7**, dapat diamati pengaruh tingkat kepadatan, waktu, dan variasi kadar air terhadap friksi tiang. Dapat disimpulkan dari hasil data semua sampel baik dengan kadar air optimum (*OMC*), *wetting* 5% (*OMC + 5%*), dan *wetting* 10% (*OMC + 10%*) pada waktu pengujian 3 hari, 7 hari, dan 14 hari bahwa semakin tinggi tingkat kepadatan tanah maka semakin besar

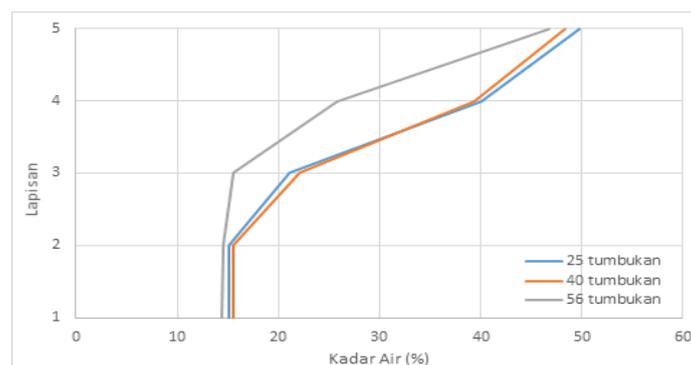
nilai friksi tiang yang didapat. Secara keseluruhan terdapat penurunan nilai friksi tiang sebesar 67% dari tingkat kepadatan tanah 56 tumbukan terhadap 40 tumbukan dan 47% dari tingkat kepadatan tanah 40 tumbukan terhadap 25 tumbukan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya kepadatan tanah, maka akan tercapai proses pengecilan pori dalam tanah dan bertambahnya kuat geser tanah sehingga diperoleh nilai friksi tiang yang lebih tinggi. Hal ini didukung dengan penelitian yang dilakukan oleh Yuliet, Hakam, dan Febrian (2011).

Dapat disimpulkan pula bahwa kondisi kadar air dengan *wetting* 5% dominan memiliki nilai friksi tiang yang paling besar dibandingkan dengan variasi kadar air optimum (*OMC*) dan *wetting* 10% (*OMC* + 10%). Hal ini dipengaruhi oleh material tiang yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari baja yang memiliki campuran logam besi yang bersifat reaktif saat terkena air, maka salah satu alasan terkait kondisi kadar air dengan *wetting* 5% (*OMC* + 5%) menghasilkan nilai friksi yang paling besar adalah sifat dari logam besi yang teroksidasi sehingga menyebabkan daya hisap tanah (*suction*) terhadap tiang menguat. Seperti yang dinyatakan oleh Amalia, Rohmadoniati, Soedarsono, dan Pratikso (2013) daya pikul yang lebih besar terjadi saat kondisi tanah jenuh dan sebaliknya saat kondisi tanah tidak jenuh maka hasil yang diperoleh pada pengujian ini bisa terjadi karena alasan yang sudah dijelaskan diatas.

Faktor lain yang mempengaruhi kondisi kadar air dengan *wetting* 5% menghasilkan nilai friksi yang paling besar adalah sifat tanah ekspansif yang mengembang (*swelling*) saat terjadi infiltrasi sehingga porositas dalam tanah terisi dengan volume air akibat infiltrasi. Hal ini menyebabkan kuat geser tanah meningkat pula sehingga berujung pada nilai friksi tiang yang bertambah. Tetapi seperti yang telah diamati, kondisi tanah yang terlalu jenuh seperti *wetting* 10% (*OMC* + 10%) menghasilkan nilai friksi tiang yang lebih kecil dibandingkan dengan kondisi *wetting* 5% (*OMC* + 10%). Hal ini bisa terjadi karena sifat destruktif dari tanah ekspansif yaitu terjadi *softening* yang terjadi saat kondisi tanah terlalu jenuh menyebabkan turunnya kapasitas friksi dari tiang (Budi, 2017).

4.2. Hasil Uji Infiltrasi Air ke Dalam Tanah

Dari **Gambar 8** dapat dilihat bahwa semakin tinggi tingkat kepadatan tanah maka kandungan kadar air yang terdapat pada tanah semakin sedikit. Pada semua sampel, kandungan air banyak terdapat di lapisan 5 namun pada lapisan ke 4 dan seterusnya sampai lapisan paling dasar (lapisan 1) kandungan air semakin sedikit.



Gambar 8 Kandungan Kadar Air Tiap Lapisan pada Sampel Tanah dengan Tingkat Kepadatan 56 Tumbukan, 40 Tumbukan, dan 25 Tumbukan

Nilai kadar air paling kecil ditunjukkan pada sampel dengan kepadatan 56 tumbukan dan nilai kadar air paling besar ditunjukkan pada sampel dengan kepadatan 25 tumbukan. Hal ini membuktikan bahwa dengan meningkatnya kepadatan tanah maka penyerapan air pada tanah bisa dikurangi. Pori-pori pada tanah dengan tingkat kepadatan yang lebih tinggi lebih kecil sehingga air tidak dapat menembus ke lapisan bawah dengan mudah (permeabilitas rendah), begitupula sebaliknya. Dapat disimpulkan bahwa

penyerapan air pada tanah berkurang dengan meningkatnya kepadatan tanah dan penyerapan air pada tanah bertambah dengan menurunnya kepadatan tanah.

5. KESIMPULAN

- Semakin tinggi tingkat kepadatan tanah maka semakin besar nilai friksi tiang yang didapat, begitu pula sebaliknya.
- Sampel tanah dengan kadar air yang mengalami *wetting 5% (OMC + 5%)* menghasilkan nilai friksi yang paling besar dibandingkan dengan variasi kadar air optimum (*OMC*) dan *wetting 10% (OMC + 10%)*.
- Pada semua sampel dengan tingkat kepadatan yang berbeda, nilai friksi tiang dari sampel dengan *wetting 5% (OMC + 5%)* meningkat secara signifikan dari pengujian 3 hari sampai 14 hari, secara keseluruhan peningkatan nilai friksi yang terjadi sebesar 20%.
- Semakin tinggi tingkat kepadatan tanah maka permabilitas tanah semakin kecil begitu pula sebaliknya. Laju infiltrasi air tidak lancar pada tanah dengan tingkat kepadatan tinggi karena pori-pori tanah menjadi kecil.

6. DAFTAR REFERENSI

- Amalia, N.A., Rohmadoniati, V., Soedarsono, & Pratikso. (2013). "Analisa Perilaku Tanah Ekspansif Pada Tiang Pancang, Ditinjau dari Variabel Kadar Air dan Material". *Unissula Repository*, C-36.
- Badawi, B., & Indarto. (2010). "Behavior of Expansive Undisturbed and Remolded Soil Under Drying Wetting Cycles". *National Conference VI 2010 Civil Engineering ITS*, 105-112.
- Budi, G.S. (2017). "Settlement of Residential Houses Supported by Piled Foundation Embedded in Expansive Soil". *Procedia Engineering*, (171), 454-460.
- Lestari, G.A.A.I. (2014). "Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif". *Ganec Swara*, 8(2).
- Tjandra, D., Indarto, & R.A.A., Soemitro. (2013). "The Effects of Water Content Variation on Adhesion Factor of Pile Foundation in Expansive Soil". *Civil Engineering Dimension Journal*, 13(2), 114-119.
- Wibisono, R., & Hendarlim, Y. (2002). "Efektifitas Beberapa Metode Stabilisasi Tanah Ekspansif Daerah Surabaya Barat". *Scientific Repository Petra Christian University*.
- Yuliet, R., Hakam, A., & Febrian, G. (2011). "Uji Potensi Mengembang pada Tanah Lempung dengan Metoda Free Swelling Test". *Jurnal Rekayasa Sipil*, 7(1).
- Zhan, T.L.T., Chen, R., & Ng, C.W.W. (2013). "Wetting-Induced Softening Behavior of an Unsaturated Expansive Clay". *Landslides*, 11(6), 1051-1061.