



Pengaruh Kadar Air Awal dan *Surcharge Pressure* pada Uji Karakteristik Pengembangan Tanah Ekspansif

*Willis Diana, Edi Hartono, Anita Widiанти

Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

*)willis.diana@umy.ac.id

Received: 6 September 2017 Revised: 7 Oktober 2017 Accepted: 18 Oktober 2017

Abstract

Expansive soils experience volumetric changes due to water content changes. These volumetric changes cause swell and shrink movement in soils, which in turn will inflict severe damage to structures built above them. A proper understanding of how the expansive soil behaves during the wetting/drying process is essential for assessing the mitigation action and design suitable foundation. The structures that build above expansive soil bed are susceptible to heave and to withstand swell pressure, thus the swell pressure must be considered in the design. This study focuses on swelling properties of two expansive clay from Ngawi, East Java and Wates, Yogyakarta. Laboratory test on disturbed samples is used to identified and to measured swelling properties. A series of swelling test was performed under constant soil dry density. The influence of initial water content and surcharge pressure on swelling properties of compacted samples were investigated. The swelling properties test used ASTM standard 4546-03 method B. It was found that the lower initial water content the higher the swell percent, but the swell pressure seems not to be affected by initial water content. At the same initial water content, swell percent decrease with the increase of surcharge pressure, but swell pressure remains unchanged.

Keywords: *Expansive soil; moisture content; surcharge pressure; swell pressure; swell percent*

Abstrak

*Tanah ekspansif akan mengalami perubahan volume jika terjadi perubahan kadar air. Perubahan volume akan menyebabkan tanah mengalami pengembangan dan penyusutan, yang selanjutnya dapat menyebabkan kerusakan pada struktur di atasnya. Pemahaman yang baik tentang perilaku tanah ekspansif selama proses kembang susut tanah penting untuk menentukan metode pencegahan, perbaikan sifat tanah ekspansif, dan metode perancangan struktur yang tepat. Penelitian ini terfokus pada pengaruh kadar air awal dan tekanan (*surcharge pressure*) yang diberikan pada spesimen uji swell-consolidation tanah ekspansif terhadap karakteristik deformasi dan tekanan pengembangan tanah. Sampel tanah diambil dari Ngawi, Jawa Timur dan Wates, D.I. Yogyakarta. Pengujian soil properties untuk identifikasi dan swelling properties terhadap sampel remoulded dilakukan di laboratorium. Sejumlah pengujian swelling properties berdasarkan ASTM standard 4546-03 metode B dilakukan terhadap sampel dengan berat volume kering yang sama dan variasi dilakukan terhadap kadar air awal sampel dan tekanan (*surcharge pressure*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin rendah kadar air awal sampel, persen pengembangan semakin besar, tetapi tekanan pengembangan terlihat tidak dipengaruhi oleh kadar air awal. Semakin besar tekanan yang diberikan terhadap sampel, persen pengembangan semakin berkurang. Tekanan pengembangan tidak pula dipengaruhi oleh besarnya tekanan yang diterapkan (*surcharge pressure*) pada spesimen uji untuk kedua jenis sampel tanah.*

Kata-kata kunci: *Tanah ekspansif; kadar air; surcharge pressure; persen pengembangan; tekanan pengembangan.*

Pendahuluan

Tanah ekspansif adalah tanah yang dapat mengalami perubahan volume jika terjadi perubahan kadar air. Tanah jenis ini biasanya berupa tanah lempung koloidal yang berasal dari mineral *hydrophilic* seperti montmorillonite, illite, vermiculite, dsb. Pada saat tanah ekspansif mengalami pengembangan, tanah akan mengangkat fondasi atau bangunan di atasnya, jika besarnya gerakan pengangkatan ini berbeda antara satu titik dengan titik lainnya maka dapat menyebabkan bangunan di atasnya mengalami tegangan berlebih, timbul retak-retak, dan kerusakan struktur. Sehingga pengetahuan mengenai perilaku tanah ekspansif sangat penting, terutama untuk struktur-struktur dengan bentang yang luas dan struktur ringan, dengan berat sendiri relatif kecil, dan tidak mampu melawan tekanan pengembangan tanah.

Beberapa metode telah berkembang untuk memperkirakan besarnya pengembangan dan tekanan pengembangan tanah ekspansif. Secara umum metode ini dibagi menjadi dua, yaitu metode perkiraan langsung (*direct*) dan tidak langsung (*indirect*), metode tidak langsung adalah berdasarkan pendekatan statistik empiris dan semiempiris yang menghubungkan persen pengembangan dan tekanan pengembangan dengan parameter seperti batas-batas Atterberg, kandungan lempung, aktifitas, susut linier, kadar air, *suction* tanah, dan kombinasi dari dua atau beberapa parameter tersebut (Al-Shamrani dan Dhowian, 2003). Metode langsung berupa pengukuran pengembangan berdasarkan pengukuran *heave* (*displacement* vertikal) satu dimensi menggunakan alat oedometer dan pengukuran tiga dimensi menggunakan model alat triaksial. Pengujian deformasi pengembangan langsung di laboratorium terhadap sampel tidak terganggu (*undisturbed*) maupun sampel *remoulded* merupakan cara yang terbaik untuk menentukan potensi pengembangan dari tanah ekspansif ini (Kezhen dan Luocheng, 2009).

Faktor internal yang mempengaruhi besarnya persen pengembangan dan tekanan pengembangan di laboratorium seperti jenis mineral, luas permukaan spesifik tanah, kapasitas pertukaran kation, dan karakteristik dari air pori. Faktor eksternal seperti parameter pemadatan (berat volume kering dan kadar air), jenis usaha pemadatan, sifat jenis cairan yang digunakan (Agus *et al.*, 2013) dan tekanan (*surchage pressure*) yang diterapkan saat pengujian (Kezhen dan Luocheng, 2009).

Beberapa peneliti menyatakan bahwa kepadatan kering tanah adalah faktor yang paling menentukan karakteristik pengembangan tanah, ketika kepadatan kering meningkat, baik persen pengembangan maupun tekanan pengembangan akan meningkat (Chen, 1975; Villar & Lloret, 2008; Kezhen dan Luocheng, 2009; Daffala, 2012; Zhang *et al.*, 2006; Rashid *et al.*, 2013; Mehmood *et al.*, 2011). Kezhen dan Loucheng (2009) menyatakan bahwa deformasi pengembangan adalah berbanding lurus dengan kadar air dan kepadatan kering, dan berbanding terbalik secara eksponensial dengan tekanan *surchage*. Villar and Lloret (2008) menyatakan bahwa peningkatan kepadatan kering akan meningkatkan persen pengembangan dan tekanan pengembangan secara eksponensial. Tekanan pengembangan tidak dipengaruhi oleh kadar air awal, dan tekanan *surchage* mempengaruhi persen pengembangan selama penjuanan. Sorochan (1991) menyatakan bahwa tekanan pengembangan dipengaruhi oleh kepadatan kering dan kadar air. Chen (1975) menyimpulkan bahwa kepadatan kering adalah satu satunya faktor yang mempengaruhi tekanan pengembangan, tekanan pengembangan meningkat dengan peningkatan kepadatan kering. Tekanan pengembangan tidak dipengaruhi oleh tekanan *surchage*, kadar air awal, derajat kejenuhan, dan ketebalan lapis tanah ekspansif.

Para peneliti telah menjelaskan pengaruh kadar air awal terhadap perilaku tanah ekspansif, sebagian menyebutkan bahwa persen pengembangan besarnya tergantung pada kadar air awal sampel, semakin besar kadar air awal, semakin kecil persen pengembangan, tetapi tekanan pengembangan tidak dipengaruhi oleh kadar air awal. Sedangkan peneliti lainnya menyebutkan bahwa kadar air awal mempengaruhi tidak saja persen pengembangan tetapi juga tekanan pengembangan. Perbedaan ini biasanya disebabkan karena perbedaan material specimen, beda peralatan, beda kondisi pembebanan, dan sebagainya. Sehingga hal ini tidak dapat digunakan sebagai standar secara umum, dan hanya bisa digunakan untuk tanah tertentu di wilayah-wilayah tertentu (Al-Shamrani dan Dhowian, 2003).

Daffala (2012) menyarankan agar perkiraan parameter pengembangan tanah ekspansif seharusnya tidak berdasarkan pada sifat tanah yang berbeda asal dan komposisi mineralnya. Perilaku dan kecenderungan tanah ekspansif dari literatur dan jurnal hanya bisa digunakan sebagai petunjuk umum dan pengaruh faktor-faktor seperti kadar air awal dan tekanan *surchage* harus diuji pada masing-masing tanah, sebab kandungan lempung dan mineral masing-masing tanah sangat mempengaruhi keseluruhan perilaku perubahan

volume, dan harus dilakukan penilaian secara kasus perkasus.

Penelitian ini menitikberatkan pada pengukuran parameter pengembangan tanah, yaitu persen pengembangan dan tekanan pengembangan tanah pada dua jenis tanah ekspansif dari Ngawi, Jawa Timur dan Wates, D.I. Yogyakarta terhadap pengaruh kadar air awal dan tekanan *surchage*, karena kondisi awal (*placement condition*) memegang peranan penting terhadap perilaku proses pengembangan (*swelling*) tanah ekspansif. Disamping hal tersebut, pemahaman yang menyeluruh dan benar terhadap proses kembang susut tanah ekspansif sangat penting untuk menentukan tindakan pencegahan, perbaikan, dan perancangan struktur yang berdiri di atas tanah ekspansif.

Material Sampel dan Program Penelitian

Untuk menyamakan persepsi, beberapa istilah yang digunakan dalam tulisan ini memiliki pengertian sebagai berikut, pengembangan (*heave*) berarti penambahan tebal (tinggi) (Δh), dari suatu kolom tanah dengan tinggi semula (h) yang menyertai penyerapan air. Persen pengembangan adalah rasio penambahan atau pengurangan tinggi (Δh), terhadap tinggi awal kolom tanah atau $\Delta h/h \times 100$. Tekanan pengembangan adalah tekanan yang dibutuhkan untuk mengembalikan spesimen tanah kembali pada ukuran asalnya (baik tinggi maupun angka pori awal) setelah spesimen mengalami pengembangan. Tekanan *surchage* (*surchage pressure*) adalah tekanan yang diterapkan pada spesimen saat pengujian *swell-consolidation*.

Material properties

Tanah ekspansif diperoleh dari desa Soko, Ngawi, Jawa Timur dan Wates, DI Yogyakarta, tanah lempung dari kedua daerah tersebut diketahui memiliki tingkat ekspansifitas sedang sampai tinggi (Binamarga, 2005). Sampel *disturbed* dikumpulkan dari lokasi pada kedalaman 1 m sampai dengan 2 m dari permukaan tanah. Tanah kemudian dikeringkan, dihaluskan dan disaring hingga lolos saringan no. 10. Sifat fisik tanah seperti pada Tabel 1.

Dari sifat fisik tanah dalam Tabel 1, nilai batas-batas Atterberg menunjukkan bahwa tanah yang digunakan sebagai sampel memiliki tingkat ekspansifitas yang tinggi. Berdasarkan nilai *Free Swell Ratio* (FSR) dan *Free Swell Index* (FSI) kedua tanah memiliki tingkat ekspansifitas yang kritis sampai parah.

Tabel 1. Sifat fisik tanah

<i>Soil properties</i>	Sampel tanah Ngawi	Sampel tanah Wates
<i>Specific gravity</i>	2,65	2,60
Batas cair (%)	94,39	88,11
Batas plastis (%)	34,58	26,05
Batas susut (%)	11,63	12,73
Indeks plastisitas (PI) (%)	59,81	57,26
<i>Percent finer</i> < 2 μ m (%)	96,32	87,32
Klasifikasi USCS	CH	CH
Kepadatan kering maksimum	1,25	1,31
(<i>Proctor Standard</i>) (gr/cm ³)		
Kadar air optimum	35,55	27,00
(<i>Proctor Standard</i>) (%)		
Aktifitas (Chen, 1975)	3,82	2,50
FSR (Sridharan & Prakash, 2000)	2,00	1,50
FSI (Sridharan & Prakash, 2000) (%)	100,00	45,50

Persiapan spesimen

Baik sampel tanah dari Ngawi maupun Wates, sebelum pengujian *swell consolidation*, terlebih dahulu dilakukan uji pemadatan dengan standar Proctor. Hasil uji pemadatan dengan standar Proctor diperoleh berat volume kering maksimum untuk tanah lempung ekspansif Ngawi sebesar 1,25 g/cm³ dengan kadar air optimum sebesar 35,55%. Untuk lempung ekspansif Wates, berat volume kering maksimum diperoleh sebesar 1,31 g/cm³ dan kadar air optimum 27,00%. Hasil dari uji Proctor ini yang dijadikan acuan untuk menentukan berat volume kering spesimen untuk uji *swell consolidation*.

Semua spesimen *remoulded* untuk sampel tanah dari Ngawi dipadatkan dengan berat volume kering konstan sebesar 1,25 g/cm³ dengan kadar air awal bervariasi sebesar 10%, 20% dan 35,55%. Untuk sampel tanah Wates, spesimen dipadatkan dengan berat volume kering konstan sebesar 1,31 g/cm³ dan kadar air awal sebesar 9%, 27%, dan 34%, kadar air divariasikan sesuai dengan variasi kadar air alami yang mungkin dialami tanah saat kering.

Agar dihasilkan kadar air awal sesuai dengan yang direncanakan, tanah kering dicampur dengan air dengan proporsi tertentu sehingga diperoleh kadar air seperti yang direncanakan. Campuran tanah dan air ini dibiarkan beberapa hari dalam kantong plastik pada kondisi suhu ruangan, sehingga diperoleh kadar air yang seragam untuk satu variasi kadar air. Tekanan *surchage* untuk kedua jenis sampel divariasikan sebesar 1,2 kPa, 6,9 kPa, 10 kPa, 20 kPa. Variasi pengujian ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Variasi pengujian

Sampel	Kadar air wal (%)	Tekanan surcharge (kPa)
Sampel tanah Ngawi	10,00	1,20
	10,00	6,90
	10,00	10,00
	10,00	20,00
	20,00	6,90
Sampel tanah wates	35,50	6,90
	9,00	6,90
	27,00	6,90
	27,00	10,00
	27,00	20,00
	35,00	6,90

Program Penelitian

Untuk melakukan penelitian ini, digunakan *frame oedometer* dan sel oedometer konvensional. Spesimen dipadatkan langsung dalam cincin oedometer yang berdiameter 6,35 cm dan tinggi 2,00 cm. Tinggi awal spesimen kurang lebih 1,60 cm. Spesimen yang telah dipadatkan, diletakkan dalam sel oedometer dengan batu pori dibagian atas dan bawahnya.

Tekanan *surcharge* diberikan pada spesimen sebelum sel oedometer digenangi air. Besarnya tekanan *surcharge* seperti pada Tabel 2. Pengujian dilakukan sesuai standar ASTM D4546 metode B. Spesimen dijenuhkan dengan cara sel oedometer digenangi air, sehingga spesimen mengembang. Regangan pengembangan (persen pengembangan) yang dialami spesimen selama penjenuhan dicatat sebagai fungsi dari waktu. Pengujian pengembangan (*swell*) dilakukan sampai terjadi pengembangan sekunder, dimana laju penambahan pengembangan berikutnya sudah tidak signifikan

(kurva persen pengembangan terhadap logaritma waktu sudah asimtotis). Setelah terjadi pengembangan sekunder, dilanjutkan dengan uji konsolidasi. Spesimen diberikan beban dua kali dari beban sebelumnya, penurunan yang terjadi dicatat, uji konsolidasi untuk satu tingkat tekanan *surcharge* dilakukan selama 24 jam. Pengujian konsolidasi dilakukan sampai sampel kembali ke tinggi awal. Tekanan yang membuat sampel mencapai tinggi awal (angka pori awal) disebut tekanan pengembangan.

Hasil dan Pembahasan

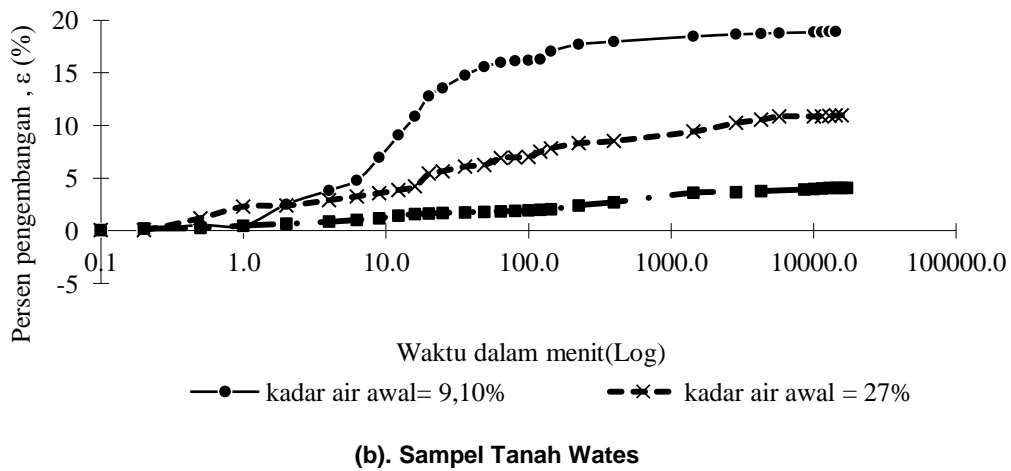
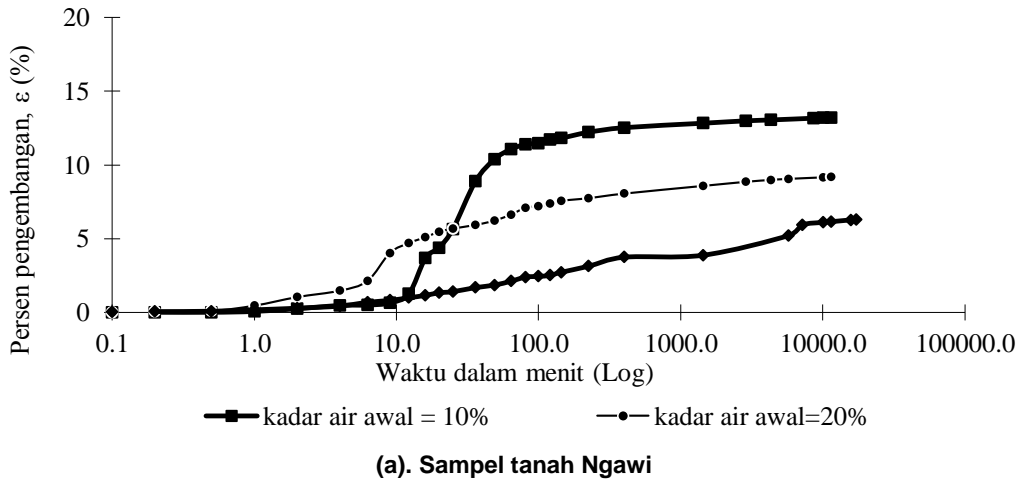
Hasil yang diperoleh dari penelitian ini disajikan dalam Tabel 3.

Persen pengembangan

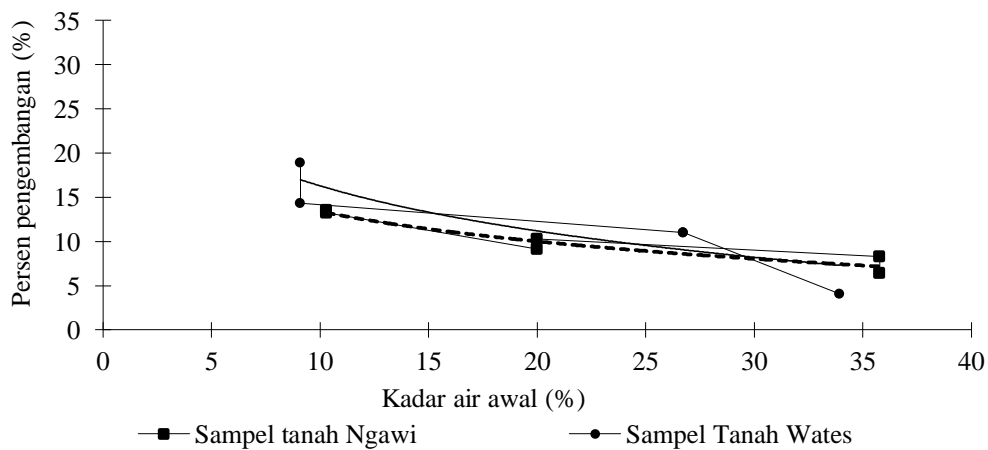
Kurva persen pengembangan terhadap logaritma waktu seperti pada Gambar 1. Pengaruh kadar air awal terhadap persen pengembangan seperti pada Gambar 2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persen pengembangan pada tingkat tegangan *surcharge* tertentu menunjukkan penurunan dengan membesarnya kadar air awal. Kadar air awal spesimen mengontrol besarnya pengembangan tanah, tanah lempung yang relatif lebih kering lebih mudah menyerap air. Pengurangan kadar air akan meningkatkan daya afinitas (tarikan) air untuk meningkatkan *matric suction* dan menyebabkan mengembangnya tanah (Chen, 1975). Ketika kadar air meningkat, kemampuan tanah untuk menyerap air menjadi berkurang dan menyebabkan terjebaknya udara dalam rongga pori sehingga sulit menggantikan rongga pori yang telah terisi udara dengan air serta sulit mencapai kontinuitas fase air dan udara.

Tabel 3. Hasil uji *swell-consolidation* tanah ekspansif

Sampel	Kadar air awal (%)	Tekanan surcharge (kPa)	Persen pengembangan (%)	Tekanan pengembangan (kPa)
Sampel tanah Ngawi	10,00	1,20	27,73	140
	10,00	6,90	13,56	140
	10,00	10,00	12,10	145
	10,00	20,00	6,45	130
	20,00	6,90	10,26	110
	35,50	6,90	8,27	145
Sampel tanah Wates	9,00	6,90	18,91	135
	27,00	6,90	11,03	140
	27,00	10,00	9,92	140
	27,00	20,00	3,51	150
	35,00	6,90	4,07	100



Gambar 1. Persen pengembangan terhadap logaritma waktu.

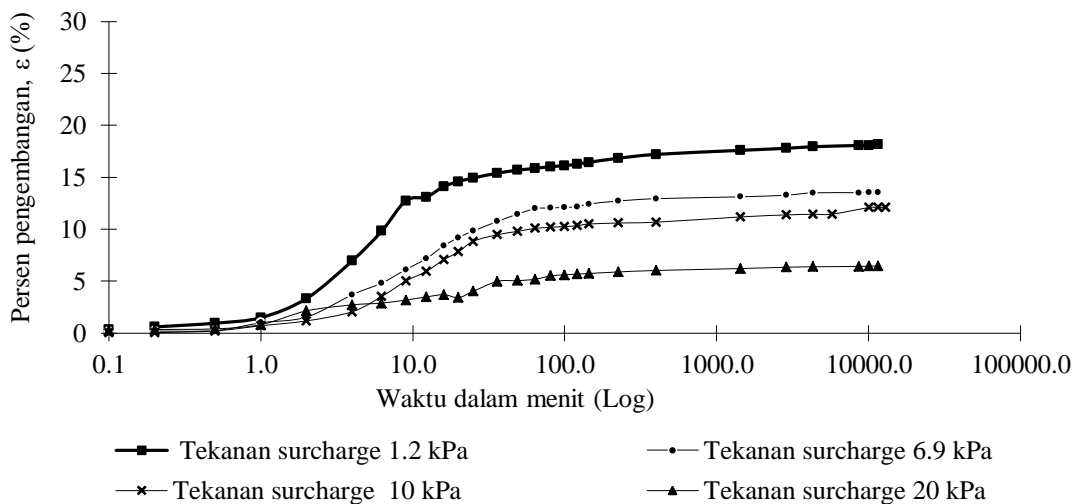


Gambar 2. Pengaruh kadar air awal terhadap persen pengembangan.

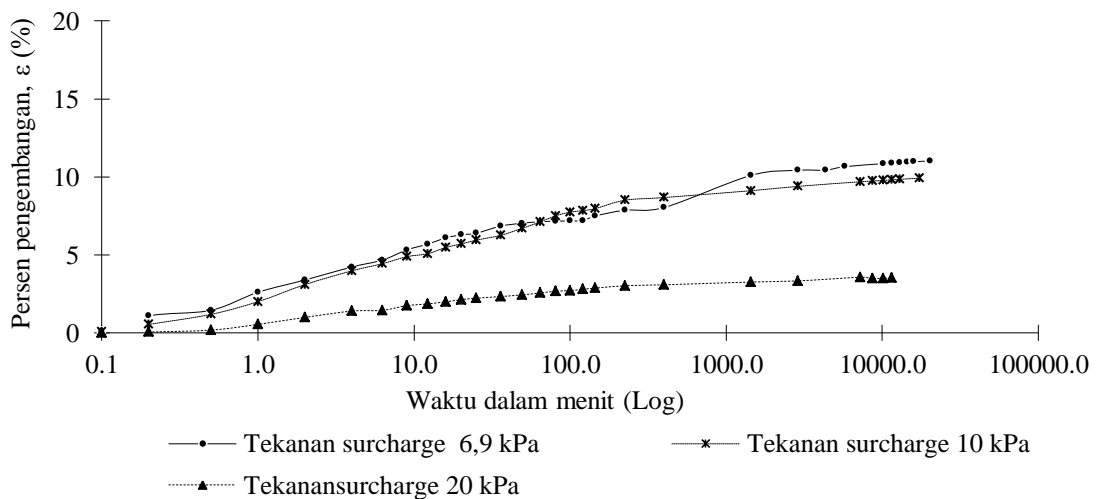
Gambar 2 memperlihatkan kecenderungan penurunan persen pengembangan pada kadar air awal yang semakin tinggi dan konvergen pada persen pengembang sekitar 6% pada kadar air yang sangat tinggi. Kadar air awal pada saat pencampuran sampel *remoulded* mempengaruhi perilaku ekspansivitas tanah, sehingga banyak

perhitungan perkiraan pengembangan tanah ekspansif menggunakan kadar air awal sebagai parameter dasarnya (Dafalla, 2012).

Gambar 3 dan 4 menunjukkan besarnya persen pengembangan terhadap fungsi waktu untuk berbagai variasi tekanan *surcharge*.

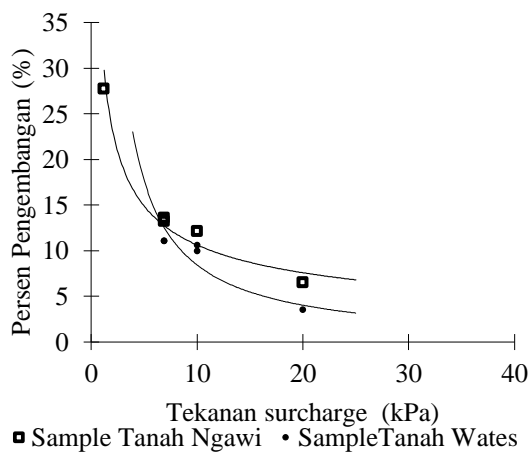


(a). Sampel tanah Ngawi



(b). Sampel tanah Wates

Gambar 3. Persen pengembangan terhadap logaritma waktu pada berbagai tingkat tekanan *surcharge*.

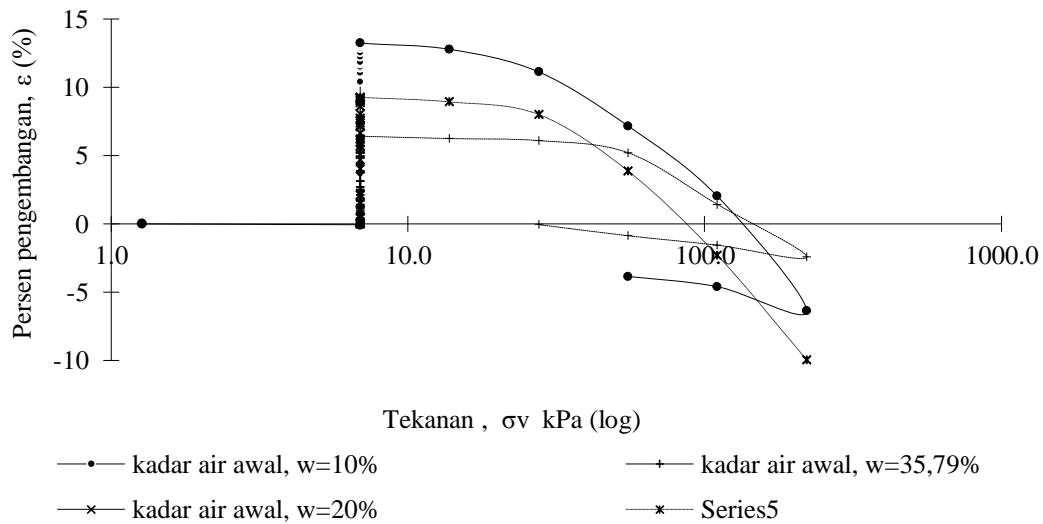


Gambar 4. Hubungan persen pengembangan terhadap pengaruh tekanan *surcharge*.

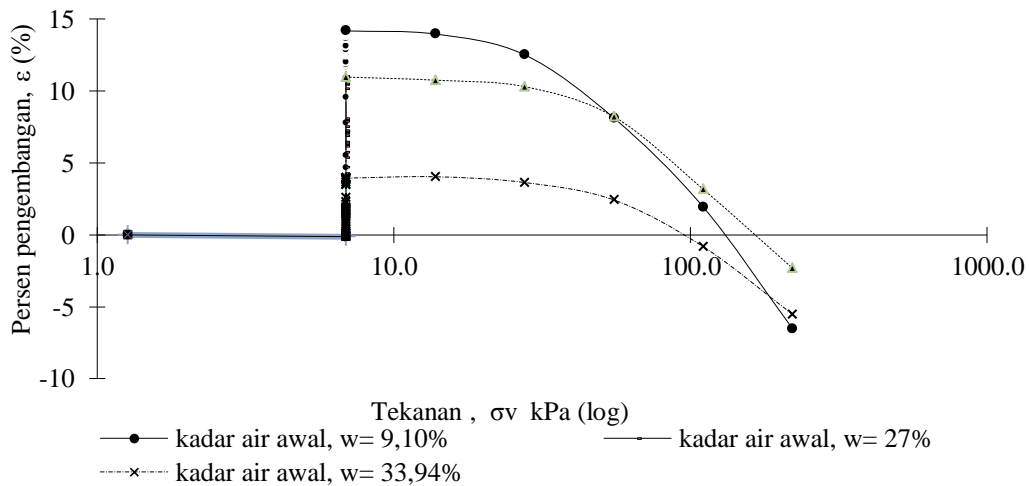
Gambar 3 dan 4 tersebut menunjukkan bahwa persen pengembangan semakin besar pada beban (tekanan *surcharge*) yang semakin kecil. Semakin membesar tekanan *surcharge*, persen pengembangan semakin berkurang. Hal ini disebabkan saat tanah mengembang, akan timbul gaya angkat, yang dilawan (diseimbangkan) dengan tekanan *surcharge*, jika tekanan *surcharge* relatif besar, pengembangan akan tertahan sehingga persen pengembangan berkurang.

Tekanan pengembangan (*swelling pressure*)

Pengaruh kadar air awal spesimen terhadap tekanan pengembangan seperti dalam Gambar 5 dan 6.

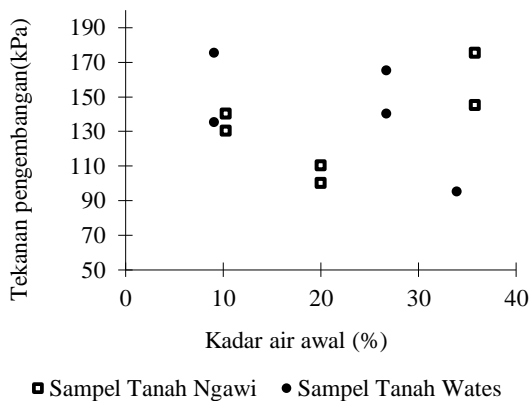


(a). Sampel tanah Ngawi



(b) Sampel tanah Wates

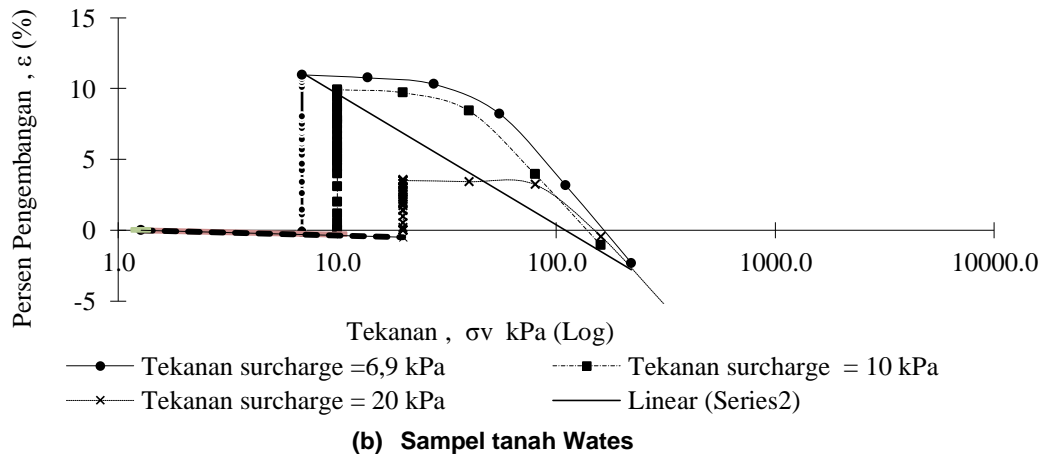
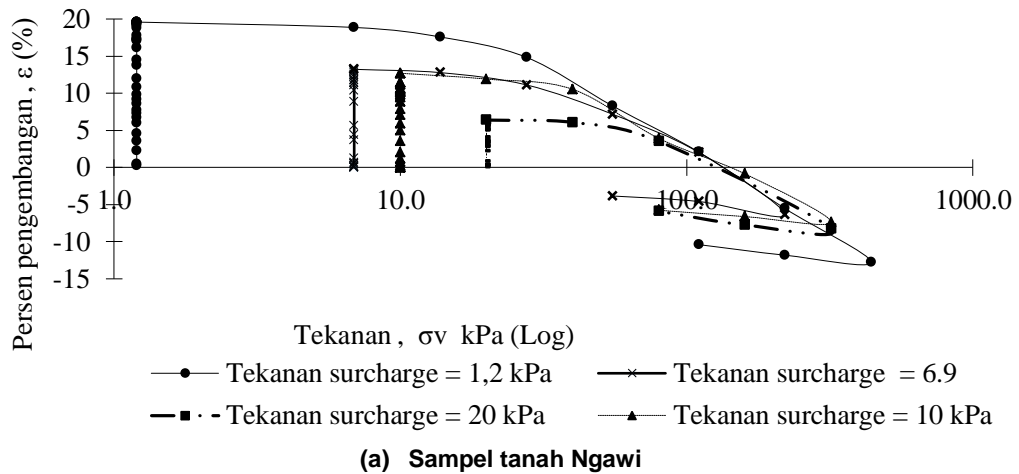
Gambar 5. Hubungan persen pengembangan dengan tekanan pada berbagai tingkat kadar air awal.



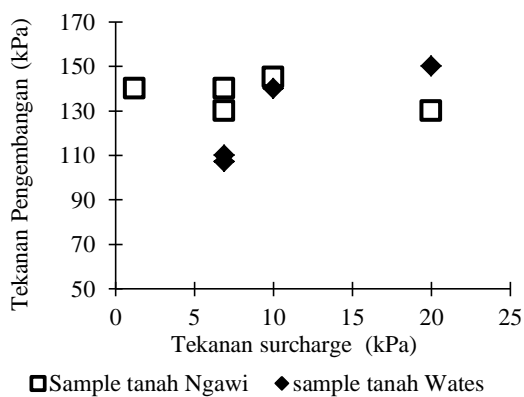
Gambar 6. Hubungan tekanan pengembangan dengan kadar air awal spesimen

Gambar 7 dan 8 menunjukkan pengaruh tekanan *surcharge* terhadap tekanan pengembangan tanah.

Hasil yang disajikan pada Gambar 5 sampai dengan 8 menunjukkan bahwa tekanan pengembangan tidak dipengaruhi oleh kadar air awal spesimen dan tekanan *surcharge*, hasil serupa juga disampaikan oleh Chen (1975) dan Villar dan Lloret (2008). Jika tekanan *surcharge* yang dibebankan pada spesimen selama penjujukan lebih rendah dari tekanan prakonsolidasi, akan menyebabkan perubahan volume yang besar pada mikrostruktur dan berkontribusi besar pada perubahan volume makrostruktur. Jika tekanan *surcharge* yang diaplikasikan lebih besar atau sama dengan tekanan prakonsolidasi, regangan mikrostruktur dan makrostruktur cenderung berkurang, sehingga pengaruh kadar air awal akan berkurang.



Gambar 7. Hubungan persen pengembangan dengan tekanan pada berbagai variasi tekanan *surcharge*.



Gambar 8. Hubungan tekanan pengembangan dengan tekanan *surcharge*.

Temuan bahwa tekanan pengembangan tidak dipengaruhi oleh kadar air awal sangat membantu untuk penilaian kelayakan proses perbaikan tanah ekspansif seperti *prewetting* dan pengontrolan pembasahan (*controlled wetting*). Metode

peningkatan kadar air (pembasahan) pada tanah ekspansif sebelum memulai konstruksi bukan metode yang efektif untuk mengontrol pengembangan tanah, walaupun persen pengembangan berkurang, tetapi tekanan pengembangan tanah yang membebani fondasi atau struktur di atasnya tetap sama besarnya. Sehingga, walaupun telah dilakukan pra pembasahan (*pre-wetting*) sebelumnya, pada perancangannya tekanan pengembangan harus diperhitungkan dalam perencanaan strukturnya.

Kesimpulan

Pengujian *swell-consolidation* telah dilakukan dan *swelling properties* untuk kedua jenis tanah telah diperoleh. Besarnya persen pengembangan dipengaruhi oleh nilai kadar air awal dan tekanan pengembangan. Makin besar nilai kadar air awal, semakin kecil persen pengembangan tanah, hal ini berlaku untuk kedua tanah ekspansif.

Semakin besar tekanan *surchage* yang diaplikasikan pada spesimen untuk kedua jenis tanah, semakin kecil persen pengembangan tanah. Artinya kondisi awal sampel (*placement condition*) sangat mempengaruhi perilaku pengembangan tanah ekspansif.

Persen pengembangan untuk tanah sampel dari Ngawi sebesar 27,73% dan tekanan pengembangana sebesar 140 kPa untuk spesimen dengan kadar air awal 10% dan tekanan *surchage* yang membenani spesimen sebesar 1,2 kPa.

Persen pengembangan untuk tanah sampel dari Wates sebesar 18,91% dan tekanan pengembangana sebesar 135 kPa untuk spesimen dengan kadar air awal 9% dan tekanan *surchage* yang membenani spesimen sebesar 6,9 kPa.

Pada penelitian ini besarnya tekanan pengembangan tanah tidak dipengaruhi oleh nilai kadar air awal dan tekanan *surchage*. Spesimen yang diuji dengan berbagai variasi kadar air awal menghasilkan tekanan pengembangan yang sama.

Pemberian tekanan *surchage* yang lebih besar menurunkan persen pengembangan, tetapi tekanan pengembangan relatif tetap.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini terlaksana melalui Hibah Penelitian Produk Terapan (PPT) Ristek Dikti Tahun 2017, sesuai Surat Perjanjian Pelaksanaan Nomor: 047/HB-LIT/IV/2017, Jum'at 14 April 2017; SP DIPA-042.06.1.401516/2017; tertanggal 7 Desember 2016. Diucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi Dikti Republik Indonesia, Kopertis Wilayah V dan LP3M UMY atas dana dan dukungan pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

Agus, S. S., Arifin, Y. F., Tripathy, S., & Schanz, T. (2013). Swelling pressure–suction relationship of heavily compacted bentonite–sand mixtures. *Acta Geotechnica*, 8(2), 155-165.

Al-Shamrani, M. A., & Dhowian, A. W. (2003). Experimental study of lateral restraint effects on the potential heave of expansive soils. *Engineering Geology*, 69(1), 63-81.

Chen, F. H. (1975). *Foundations On Expansive Soils* (First ed.). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

Dafalla, M. A. (2012). The influence of placement conditions on the swelling of variable clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(6), 1311-1321.

Yan, K., & Wu, L. (2009). Swelling Behavior of Compacted Expansive Soils. In *Recent Advancement in Soil Behavior, in Situ Test Methods, Pile Foundations, and Tunneling: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference* (pp. 1-6).

Mehmood, E., Ilyas, M., & Farooq, K. (2011). Effect of initial placement conditions on swelling characteristics of expansive soils. In *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 2397-2403).

Rashid, I., Farooq, K., Mujtaba, H., & Khan, A. H. (2013). Treatment of Expansive Clays Through Compaction Control. *Pakistan Journal of Science*, 65(1), 103-107.

Sorochan. (1991). *Construction of Buildings on Expansive Soils*. Brookfield: A.A. Balkema Publishers.

Villar, M. V., & Lloret, A. (2008). Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 39(1), 38-49.

Zhang, R., Yang, H., & Zheng, J. (2006). The effect of vertical pressure on the deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying. In *Unsaturated Soils 2006* (pp. 894-905).