

Pengaruh Siklus Basah – Kering terhadap Kekuatan Geser dan Ekspansivitas Campuran Kaolin – Montmorillonit - Pasir

Edwin Laurencis Hendrikus & Hasbullah Nawir

Kelompok Keahlian Rekayasa Geoteknik

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132

E-mail: edwin_laurencis@hotmail.com, hasbullah@si.itb.ac.id

ABSTRAK: Sebagian besar daerah Indonesia terdiri dari tanah lempung ekspansif. Tanah ekspansif sering menyebabkan permasalahan geoteknik karena perilakunya yang sensitif terhadap air. Penelitian ini ditujukan untuk mempelajari efek siklus basah-kering terhadap perilaku tanah lempung ekspansif yang distabilisasi pasir. Perilaku yang ditinjau adalah kekuatan geser dan potensi pengembangan. Tanah yang digunakan adalah tanah artifisial yang dibentuk dari bentonit, kaolin, dan pasir. Pasir yang digunakan adalah pasir bergradasi baik. Ada dua variasi yang dilakukan dalam penelitian ini, yakni variasi jumlah siklus basah-kering dan variasi kadar mineral lempung. Kadar pasir ditetapkan sebesar 20% terhadap massa kering tanah. Pembentukan tanah artifisial dilakukan pada kondisi kadar air optimum, kemudian siklus basah-kering dilakukan pada tanah artifisial sebelum diuji. Beberapa pengujian dilakukan pada sampel ini, meliputi pengujian terhadap batas plastisitas, berat jenis, parameter pemadatan, distribusi ukuran butir pasir, dan kandungan mineral tanah. Melalui pengujian diperoleh hasil bahwa penambahan pasir sebesar 20% pada tanah ekspansif tidak mencegah penurunan kekuatan geser tak teralir, namun mereduksi potensi pengembangan. Dapat disimpulkan bahwa penambahan pasir hanya efektif untuk mencegah pengembangan dibandingkan untuk meningkatkan kuat geser tanah lempung ekspansif akibat siklus berulang basah-kering.

Kata kunci: *tanah ekspansif, stabilisasi tanah, pasir, siklus basah-kering*

ABSTRAK: Expansive clay is widely distributed in Indonesia. The soil often causes geotechnical problems due to its water-sensitive behavior. This paper presents the results of study on the effect of wetting-drying cycles on the behavior of sand-stabilized expansive clay. The study focused on the effect of wetting-drying cycle on shear strength and swelling potential. The sample is remolded artificial soils consisting of bentonit, kaolinit, and well-graded sand. Two variables are used in the research i.e. number of cycle and clay mineral contents. The sand content is constant at 20% of dry soil mass. Remolded artificial soil samples is formed at optimum moisture content, then wetting – drying cycles are applied to the samples. Laboratory tests including plasticity limit, specific gravity, compaction parameters, grain size distribution of sand, and soil mineral content were performed to define the characteristics of the material before and after wetting – drying cycles. The results show that the addition of 20% sand in expansive soils did not impede the degradation of undrained shear strength, but helped reduce swelling potential. It can be concluded that the addition of sand is only effective for avoiding swelling potential but does not increasing shear strength due to wetting-drying cycle.

Kata kunci: *expansive soil, soil stabilization, sand, dry-wet cycle*

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan daerah dengan iklim tropis dengan musim hujan dan kemarau sangat dominan, sehingga mempengaruhi karakteristik tanah lempung yang tersebar luas. Perubahan cuaca menyebabkan tanah lempung mengalami kondisi basah – kering yang tak menentu. Beberapa studi yang pernah dilakukan menunjukkan bahwa adanya siklus basah – kering menyebabkan perubahan potensi pengembangan dan kekuatan tanah terutama tanah lempung yang mengandung mineral ekspansif seperti montmorillonit dan kaolinit (Mitchell, 1992). Kondisi ini sangat mempengaruhi karakteristik mineral tanah lempung ekspansif seperti yang sudah disebutkan sebelumnya.

Para ahli geoteknik telah melakukan berbagai upaya untuk menangani sifat buruk yang ditimbulkan tanah lempung ekspansif. Salah satu upaya perbaikan tanah yang umum digunakan adalah dengan menambah material aditif, misalnya *fly ash* (Budi et al. (2003), kapur (Hardiyati, 2003), atau bahkan pasir

(Seta, 2006) dengan tujuan menambah kekuatan tanah serta mengurangi potensi pengembangannya. Pasir diprediksi dapat menjadi alternatif sebagai material aditif selain semen, kapur, dan *fly ash*.

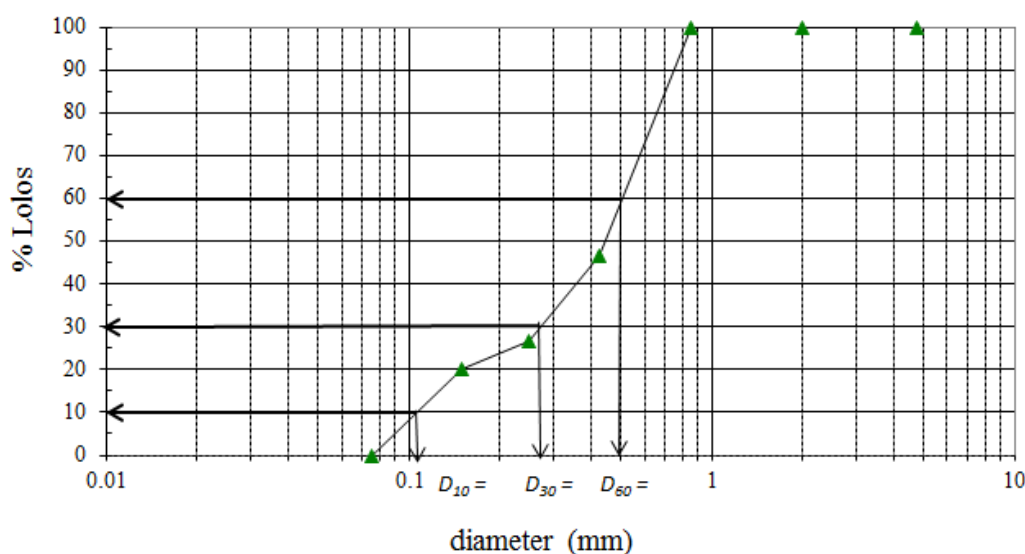
Penelitian ini ditujukan untuk mempelajari besarnya pengaruh siklus basah-kering terhadap pasir yang digunakan sebagai aditif untuk stabilisasi tanah lempung ekspansif. Untuk tujuan studi ini, model tanah lempung-pasir dibentuk secara artifisial menggunakan mineral dominan penyusun lempung, yakni montmorilonit (diperoleh dari bentonit), kaolin, dan material aditif pasir. Penggunaan tanah artifisial dimaksudkan untuk membentuk sampel tanah dalam jumlah banyak dengan karakter yang seragam dengan berbagai komposisi yang dapat dikontrol.

2. BAHAN DAN METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan mulai dari persiapan bahan, pembuatan sampel dan pengujian termasuk Atterberg Limit, pengujian Kuat geser tanah, dan pengujian tingkat ekspansivitas tanah. Kesemua tahapan ini dilakukan di laboratorium. Pengujian dilakukan dengan mengikuti standar SNI yang berkaitan.

2.1 Persiapan Tanah Lempung Artifial dan Pasir

Dalam penelitian ini sampel tanah lempung dibentuk secara artifisial menggunakan material kaolin dan bentonit sebagai bahan baku serta pasir sebagai bahan aditif. Pasir yang digunakan adalah pasir sungai yang umum digunakan sebagai bahan baku pembuatan beton. Agar pasir terbebas dari fraksi lempung, maka pasir harus dicuci sampai bersih berulang-ulang dan dioven. Dalam penelitian ini, kriteria pasir yang digunakan bergradasi baik ($C_u = 6$ dan $C_c = 1,5$). Untuk memperoleh kriteria ini, pasir disaring sehingga dapat dipisahkan untuk tiap ukuran butirnya. Kemudian dilakukan perhitungan berulang-ulang untuk memperoleh pasir dengan gradasi yang sudah ditetapkan. Hasil desain distribusi ukuran pasir ditampilkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Kurva desain gradasi ukuran butir pasir yang digunakan

Empat (4) variasi kadar mineral bentonit dan kaolin digunakan dalam penelitian ini. Untuk kepentingan prosedur penelitian diperlukan penamaan sampel berdasarkan jumlah mineral montmorilonit dan kaolin serta jumlah pasir yang ditambahkan, seperti yang ditampilkan pada Tabel 1. Penulisan label untuk penamaan benda uji menggunakan format (Bx-Ky+20%) dengan x dan y berturut-turut merupakan kadar material Bentonit dan Kaolin (dalam persen) terhadap berat kering Lempung, sedangkan 20% merupakan kadar Pasir terhadap berat kering Tanah.

Tabel 1. Penamaan sampel uji yang digunakan

Label Sampel (Variasi)	Persentase Berat Material Terhadap Berat Tanah Kering (80%)		
	Bentonit	Kaolin	Pasir
B90-K10+20%	72%	8%	20%
B75-K25+20%	60%	20%	20%
B50-K50+20%	40%	40%	20%
B25-K75+20%	20%	60%	20%

Campuran dibentuk sesuai persentase kadar material pada Tabel 1. Pencampuran material dilakukan dalam keadaan kering. Agar diperoleh campuran kering yang merata, maka tahap ini dilakukan dengan alat bantu pengaduk (mixer).

2.2 Persiapan Benda Uji

Sampel disiapkan pada kondisi padat yaitu berat isi kering maksimum dan kadar air optimum. Untuk memperoleh parameter tersebut digunakan uji kompaksi Proctor standar yang dilakukan pada semua variasi mineral. Hasil uji kompaksi ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter kepadatan optimum tiap variasi

Variasi	w_{opt} (%)	$\gamma_{d\ max}$ (gr/cm ³)
B90-K10+20%	50,0	1,114
B75-K25+20%	47,5	1,160
B50-K50+20%	40,0	1,230
B25-K75+20%	32,5	1,395

Setelah parameter kepadatan optimum diperoleh untuk tiap variasi, tahap selanjutnya adalah membentuk suatu sampel uji dengan kondisi optimum. Hasil pencampuran ini kemudian siap digunakan untuk pengujian-pengujian selanjutnya. Pembentukan sampel uji dibagi menjadi tahap pencampuran material basah dan pemadatan secara mekanis. Media pembentukan sampel adalah pipa berbahan PVC dengan diameter yang disesuaikan dengan benda uji konsolidasi dan Triaxial pada umumnya.



(a)



(b)

Gambar 2. Alat pembentukan sampel uji (a) mold (b) alat penumbuk sampel

Melalui hasil uji kompaksi yang ditunjukkan pada Tabel 3, maka dapat ditentukan massa masing-masing material dan air yang diperlukan untuk membentuk suatu sampel uji. Hasil perhitungan yang menunjukkan kebutuhan massa masing-masing material ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan kebutuhan massa material pembentuk tanah artifisial

Variasi	B90-K10+20%		B75-K25+20%		B50-K50+20%		B25-K75+20%	
Kadar bentonit (%)	72		60		40		20	
Kadar kaolin (%)	8		20		40		60	
Kadar pasir (%)	20		20		20		20	
Pengujian	UCS		Swell		UCS		Swell	
Tinggi <i>mold</i> (cm)	10		5		10		5	
Diameter <i>mold</i> (cm)	3,7		7,1		3,7		7,1	
Volume <i>mold</i> (cm ³)	107,5		198,0		107,5		198,0	
w optimum (%)	50,0		50,0		47,5		47,5	
γ_d max (gr/cm ³)	1,114		1,114		1,160		1,16	
γ_m max (gr/cm ³)	1,671		1,671		1,711		1,711	
m tanah kering (gr)	120		221		125		230	
m tanah OMC (gr)	180		331		184		339	
m air	60		110		59		109	
m bentonit	86		159		75		138	
m kaolin	10		18		25		46	
m pasir	24		44		25		46	

2.3 Pengujian dan Penerapan Siklus Basah-Kering

Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pengujian mineralogy, batas Atterberg, Kuat tekan bebas, dan tingkat pengembangan tanah. Kesemua pengujian dilakukan mengikuti standar SNI (2008) misalnya pengujian tingkat pengembangan tanah dilakukan mengikuti SNI 6424 (2008).

Siklus basah-kering yang dilakukan pada penelitian ini digunakan untuk memodelkan kondisi basah-kering yang dialami tanah di lapangan, misalnya akibat cuaca panas dan hujan. Satu siklus terdiri dari dua tahap yang didefinisikan sebagai berikut:

- i) Tahap basah, yakni perendaman sampel dalam air selama sekitar 24 jam diasumsikan tanah sudah jenuh dan sudah tidak mengalami pertambahan berat akibat penyerapan air.
- ii) Tahap kering, yakni proses pengembalian sampel uji dari kondisi jenuh menjadi kondisi optimum (OMC). Tahap ini dilakukan dengan mengeringkan sampel uji ke dalam oven bersuhu 50oC sampai massa sampel (dan mold) kembali ke massa semula seperti kondisi setelah dibentuk. Setelah tahap kering selesai, sampel dapat diuji.
- iii) Siklus nol (0) artinya sampel tersebut langsung diuji setelah dibentuk tanpa penerapan tahap basah atau kering. Untuk sampel yang mengalami siklus lebih dari satu, maka setelah tahap basah untuk siklus berikutnya langsung diterapkan seusai tahap kering pada siklus sebelumnya.

Pengujian mineralogy dan batas Atterberg hanya dilakukan pada kondisi awal (siklus 0) dan setelah 5 kali siklus basah – kering. Sedangkan pengujian Kuat tekan bebas dan tingkat ekspansivitas dilakukan pada setiap siklus. Jumlah siklus yang diterapkan untuk masing masing pengujian ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Penerapan jumlah siklus basah-kering pada tiap sampel uji

Jumlah Siklus	Jenis Uji (dilakukan pada tiap variasi kadar mineral)
---------------	---

	Mineralogi	Batas Atterberg	Kuat Geser	Potensi Pengembangan
0x	v	v	v	v
1x	-	-	v	v
2x	-	-	v	v
3x	-	-	v	v
4x	-	-	v	-
5x	v	v	v	-

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Siklus Basah-Kering Terhadap Kadar Mineral

Uji mineralogi dilakukan pada tiap variasi yang mengalami nol dan lima siklus. Tujuannya adalah untuk memperoleh informasi mengenai perubahan jenis dan kadar mineral yang terjadi selama proses siklus basah-kering. Pada penelitian ini, perubahan kadar mineral lebih difokuskan pada perubahan kadar mineral kaolin dan montmorilonit saja meskipun terjadi perubahan kadar mineral lain. Hasil pengujian kadar mineral ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perubahan kadar kaolin dan montmorilonit antara 0 dan 5 siklus

Nama Mineral	Lambang Unsur Mineral	Perubahan Kadar Setelah 5 Siklus (%) *			
		B90-K10+20%	B75-K25+20%	B50-K50+20%	B25-K75+20%
Kaolin	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	-3.67	+18.66	+2.5	-25.26
Montmorilonit	$Na_0.(3Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$	-4.08	-4.02	-6.61	+28.69

*) Nilai negatif menunjukkan adanya pengurangan kadar terhadap siklus nol, dan sebaliknya

Hasil uji ini menunjukkan bahwa akibat siklus basah-kering, pada setiap variasi terjadi perubahan kadar mineral kaolin maupun montmorilonit yang berbeda-beda. Dengan demikian tidak dapat ditarik kesimpulan mengenai kecenderungan perubahan kadar mineral akibat siklus basah kering untuk setiap variasi mineral lempung.

3.2 Pengaruh Siklus Basah-Kering Terhadap Batas Atterberg

Uji batas Atterberg dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai sifat plastisitas tanah sebelum dan setelah mengalami siklus. Perubahan batas Atterberg untuk tiap variasi ditampilkan pada Tabel 6. Melalui data tersebut ditunjukkan bahwa siklus basah-kering menurunkan nilai masing-masing batas cair dan batas plastis tiap variasi.

3.3 Pengaruh Siklus Basah-Kering Terhadap Kuat Geser

Dari hasil pengujian kuat tekan bebas (UCS), diperoleh hubungan antara jumlah siklus basah-kering dengan kekuatan geser *undrained* untuk setiap variasi. Tabel 8 dan Gambar 3 menampilkan nilai kekuatan geser tanah dengan beberapa variasi mineral lempung dan penambahan 20% pasir pada tiap siklus.

Beberapa hal yang dapat diamati pada hasil pengujian kuat geser. Pada siklus 0 variasi B90-K10+20% menghasilkan kekuatan paling rendah. Semakin besar persentase kaolin pada siklus 0, semakin besar kekuatan tanah. Tanah dengan kadar montmorilonit yang tinggi yang belum mengalami siklus basah kering memiliki kekuatan sangat rendah. Setelah mengalami 1 siklus basah-kering, variasi B90-K10+20% mengalami peningkatan. Hal yang sama terjadi pada B75-K25+20%. Sedangkan variasi B50-

K50+20% dan B25-K75+20% mengalami penurunan. Hal ini masih terjadi sampai dengan siklus 2 namun dengan penambahan atau pengurangan yang lebih kecil.

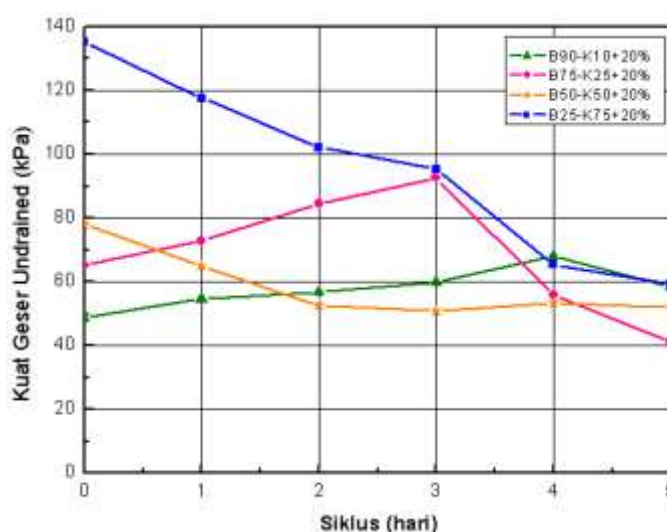
Pada siklus 3 penambahan kekuatan untuk B75-K25+20% berhenti dan untuk siklus berikutnya (4) terlihat adanya penurunan. Kejadian ini diakibatkan oleh pengaruh kaolin yang mereduksi kekuatan tanah seiring jumlah siklus basah-kering. Begitu pula untuk variasi lain dengan kadar kaolin yang lebih banyak juga masih mengalami penurunan. Pada variasi B90-K10+20% mengalami penambahan kekuatan namun tidak terlalu besar. Perubahan kekuatan sebenarnya masih terjadi sampai siklus 5 namun dapat dikatakan sudah mulai konstan atau tidak terjadi perubahan yang signifikan. Pada siklus 4 dan 5, terjadi penurunan kekuatan pada seluruh variasi.

Tabel 7. Perubahan batas Atterberg antara Siklus 0 dan Siklus 5 siklus untuk campuran dengan 20% pasir

Variasi	Batas Cair (%)	Batas Plastis (%)	Indeks Plastisitas (%)
B90-K10+20%	-38.69	-13.59	-25.10
B75-K25+20%	-29.35	-13.23	-16.12
B50-K50+20%	-13.83	-9.89	-3.94
B25-K75+20%	-24.12	-2.31	-21.81

Tabel 8. Kekuatan geser rata-rata tiap siklus campuran yang distabilisasi pasir 20%

Siklus	Kekuatan Geser Campuran Distabilisasi (kPa)			
	B90-K10 20%	B75-K25 20%	B50-K50 20%	B25-K75 20%
0	48,66	65,07	77,94	135,17
1	54,78	72,91	64,89	117,64
2	56,98	84,56	52,57	10,20
3	59,84	92,64	50,92	95,40
4	68,20	55,93	53,44	65,44
5	58,27	41,18	52,10	59,39



Gambar 3. Hubungan kuat geser dengan jumlah siklus basah-kering campuran yang distabilisasi pasir 20%

Hubungan antara siklus basah-kering dengan kadar mineral (bentonit dan kaolin) dengan tambahan aditif pasir yang sama sebesar 20% tidak terlalu menunjukkan pola yang teratur. Besarnya perubahan kekuatan geser pada tiap siklus untuk campuran dengan aditif pasir 20% ditunjukkan pada Tabel 9. Sebagai perbandingan, Tabel 10 menunjukkan perubahan kekuatan geser tiap siklus untuk tanah lempung murni.

Tabel 9. Perubahan kekuatan geser tiap siklus campuran yang distabilisasi pasir 20%

Siklus	Perubahan Kekuatan Geser Campuran Distabilisasi (kPa)			
	B90-K10+20%	B75-K25+20%	B50-K50+20%	B25-K75+20%
Antara 0-1	6,13	7,84	-13,05	-17,53
Kumulatif 0-1	6,13	7,84	-13,05	-17,53
Antara 1-2	2,20	11,65	-12,32	-15,44
Kumulatif 0-2	8,33	19,49	-25,37	-32,97
Antar 2-3	2,86	8,08	-1,65	-6,80
Kumulatif 0-3	11,19	27,57	-27,02	-39,77
Antara 3-4	8,35	-36,71	2,52	-29,96
Kumulatif 0-4	19,54	-9,14	-24,50	-69,73
Antara 4-5	-9,92	-14,76	-1,34	-6,05
Kumulatif 0-5	9,62	-23,90	-25,84	-75,78

Tabel 10. Perubahan kekuatan geser tiap siklus campuran murni

Siklus	Perubahan Kekuatan Geser Campuran Murni (kPa)			
	B90-K10	B75-K25	B50-K50	B25-K75
Antara 0-1	8,64	0,92	-8,09	-24,82
Kumulatif 0-1	8,64	0,92	-8,09	-24,82
Antara 1-2	3,31	0,74	-9,37	-22,43
Kumulatif 0-2	11,95	1,65	-17,46	-47,24
Antar 2-3	7,17	0,55	-6,07	-10,85
Kumulatif 0-3	19,12	2,21	-23,53	-58,09
Antara 3-4	5,88	0,55	-4,96	-10,85
Kumulatif 0-4	25,00	2,76	-28,49	-68,93
Antara 4-5	0,92	0,18	-2,57	-2,21
Kumulatif 0-5	25,92	2,94	-31,06	-71,14

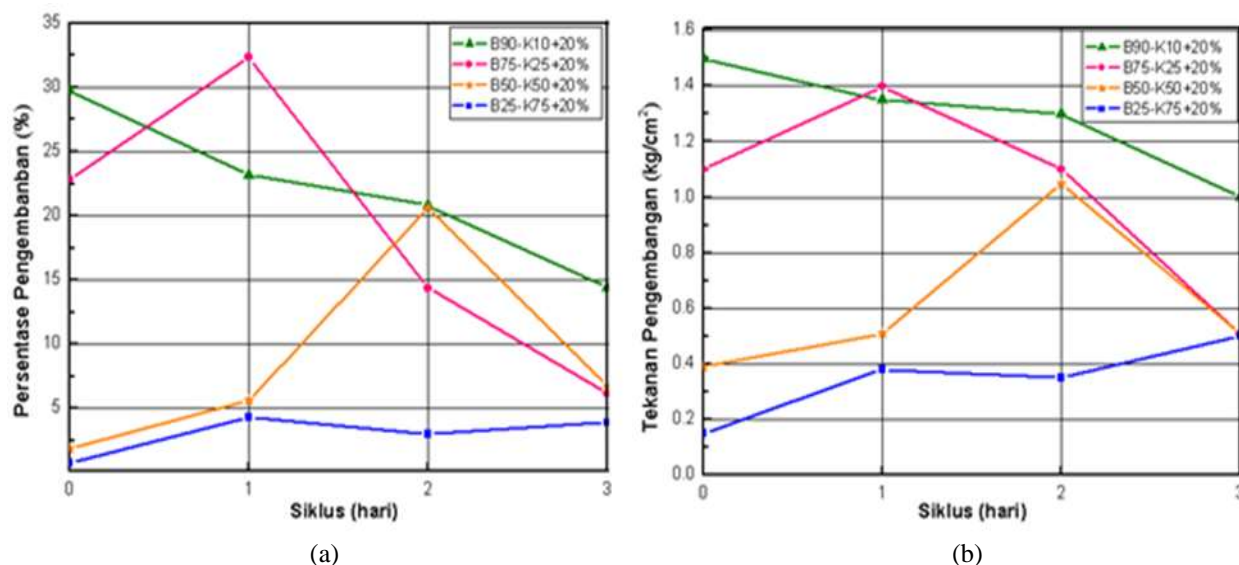
Sumber: Yonathan Setiawan (2011)

Melalui perbandingan pada Tabel 9 dan Tabel 10, dapat disimpulkan bahwa nilai kekuatan geser undrained untuk campuran yang distabilisasi pasir justru lebih rendah dibandingkan campuran murni. Hal ini terjadi pada setiap variasi yang mengalami siklus maupun tidak.

3.4 Pengaruh Siklus Basah-Kering Terhadap Potensi Pengembangan

Melalui pengujian potensi pengembangan diperoleh hubungan antara jumlah siklus basah-kering dan potensi pengembangan, yaitu berupa persentase dan tekanan pengembangan. Hubungan antara tekanan

pengembangan dan persentase pengembangan terhadap jumlah siklus digambarkan pada grafik dalam Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan potensi pengembangan dengan jumlah siklus basah-kering (a) persentase pengembangan (b) tekanan pengembangan

Berdasarkan hasil pengujian potensi pengembangan, dapat diperlihatkan bahwa pada siklus 0, nilai potensi pengembangan (baik persentase dan tekanan pengembangan) untuk B90-K10+20% adalah paling besar. Semakin kecil persentase bentonit dalam campuran akan menurunkan nilai potensi pengembangan. Variasi B25-K75+20% memiliki potensi paling kecil. Setelah mengalami 1 siklus, potensi pengembangan untuk B90-K10+20% mengalami penurunan, sedangkan untuk variasi lain mengalami peningkatan. Penambahan potensi pengembangan paling kecil terjadi pada kadar kaolin yang paling banyak, yakni B25-K75+20%. Penambahan potensi pengembangan berakhir pada siklus 1 untuk B75-K25+20% kemudian terjadi penurunan pada siklus 2. Pada siklus yang sama, variasi B50-K50+20% dan B25-K75+20% tetap terjadi kenaikan potensi pengembangan. Sedangkan B90-K10+20% terus mengalami penurunan. Setelah mengalami siklus 2, penambahan potensi pengembangan untuk B50-K50+20% berhenti dan untuk siklus 3 terjadi penurunan, seperti yang dialami variasi B75-K25+20% dan B90-K10+20%. Sedangkan pada B25-K75+20% tetap masih mengalami kenaikan namun tidak signifikan. Besarnya perubahan potensi pengembangan tiap siklus ditunjukkan pada Tabel 11 dan 12.

Dapat dilihat bahwa secara umum, penambahan pasir pada campuran tanah ekspansif pada penelitian ini menyebabkan penurunan potensi pengembangan yang lebih besar setelah tanah mengalami siklus basah-kering. Sebagai perbandingan untuk mengevaluasi pengaruh pasir terhadap stabilisasi, Tabel 13 dan 14 menunjukkan besarnya potensi pengembangan terhadap siklus basah-kering untuk tiap variasi yang sama namun dengan campuran murni (tanpa stabilisasi pasir).

Dari perbandingan pada Tabel 11 dan Tabel 13 serta Tabel 12 dan 14, diperlihatkan bahwa nilai potensi pengembangan, baik tekanan maupun persentase, pada siklus 3 untuk campuran yang distabilisasi pasir lebih rendah dibandingkan dengan campuran murni. Walaupun keduanya mengalami penurunan potensi pengembangan akibat siklus basah-kering, namun campuran yang distabilisasi pasir dengan kadar 20% menunjukkan adanya penurunan yang lebih besar.

Tabel 11. Perubahan tekanan pengembangan pada tiap siklus untuk campuran yang distabilisasi pasir 20%

Siklus	Perubahan Tekanan Pengembangan Campuran Distabilisasi (kg/cm ²)			
	B90-K10+20%	B75-K25+20%	B50-K50+20%	B25-K75+20%
Antara 0-1	-0,15	0,30	0,12	0,23
Kumulatif 0-1	-0,15	0,30	0,12	0,23
Antara 1-2	-0,05	-0,30	0,54	-0,03
Kumulatif 0-2	-0,20	0,00	0,66	0,20
Antar 2-3	-0,30	-0,59	-0,55	0,15
Kumulatif 0-3	-0,50	-0,59	0,12	0,35

Tabel 12. Perubahan persentase pengembangan pada tiap siklus untuk campuran yang distabilisasi pasir 20%

Siklus	Perubahan Persentase Pengembangan Campuran Distabilisasi (%)			
	B90-K10+20%	B75-K25+20%	B50-K50+20%	B25-K75+20%
Antara 0-1	-6,60	9,48	3,74	3,60
Kumulatif 0-1	-6,60	9,48	3,74	3,60
Antara 1-2	-2,38	-17,93	15,05	-1,35
Kumulatif 0-2	-8,98	-8,45	18,79	2,25
Antar 2-3	-6,43	-8,20	-13,95	0,93
Kumulatif 0-3	-15,40	-16,65	4,84	3,18

Tabel 13. Perubahan tekanan pengembangan pada tiap siklus untuk campuran tanah lempung murni

Siklus	Perubahan Tekanan Pengembangan Campuran Murni (kg/cm ²)			
	B90-K10	B75-K25	B50-K50	B25-K75
Antara 0-1	-1,10	-0,05	0,23	0,83
Kumulatif 0-1	-1,10	-0,05	0,23	0,83
Antara 1-2	-0,93	-0,08	0,30	0,15
Kumulatif 0-2	-2,03	-0,13	0,53	0,98
Antar 2-3	-0,11	-0,21	0,24	0,10
Kumulatif 0-3	-2,14	-0,34	0,77	1,08

Tabel 14. Perubahan tekanan pengembangan pada tiap siklus untuk campuran tanah lempung murni

Siklus	Perubahan Persentase Pengembangan Campuran Murni (%)			
	B90-K10	B75-K25	B50-K50	B25-K75
Antara 0-1	-14,61	-1,46	5,93	7,88
Kumulatif 0-1	-14,61	-1,46	5,93	7,88
Antara 1-2	-7,84	-0,91	4,32	2,83
Kumulatif 0-2	-22,45	-2,37	10,25	10,71
Antar 2-3	-4,06	-1,13	2,91	2,42
Kumulatif 0-3	-26,51	-3,50	13,16	13,13

4. Efek Agregasi dan Deagregasi Terhadap Perilaku Tanah

Perubahan kuat geser dan potensi pengembangan merupakan indikasi terhadap adanya agregasi yang terjadi akibat siklus basah-kering. Secara umum, siklus basah-kering menyebabkan terjadinya perubahan struktur tanah yang disebut dengan agregasi atau deagregasi. Agregasi terjadi karena adanya ikatan antara pasir dengan montmorilonit sehingga ukuran butir menjadi lebih besar dibandingkan ukuran butir sebelumnya, sedangkan deagregasi merupakan pelepasan ikatan butiran tanah menjadi ukuran butiran yang lebih kecil. Adanya agregasi menyebabkan permukaan spesifik tanah menjadi lebih besar, sedangkan deagregasi mengakibatkan hal sebaliknya. Permukaan spesifik yang lebih besar menyebabkan bidang interaksi antara tanah dan air menjadi lebih kecil, sehingga potensi pengembangan untuk tahap selanjutnya menjadi lebih kecil. Hal yang sebaliknya terjadi apabila tanah mengalami deagregasi.

Terjadinya agregasi dan deagregasi diindikasikan dengan adanya perubahan angka pori dan kadar air saat jenuh yang ditampilkan pada Tabel 15.

Tabel 15. Perubahan kadar air dan angka pori saat jenuh

Variasi Campuran	Jumlah Siklus	Kadar Air (%)	Angka Pori
B90-K10+20%	Siklus 0	52.16	1.393
	Siklus 1	50.97	1.366
	Siklus 2	49.90	1.332
	Siklus 3	48.50	1.295
B75-K25+20%	Siklus 0	51.52	1.375
	Siklus 1	54.97	1.468
	Siklus 2	54.73	1.461
	Siklus 3	46.80	1.250
B50-K50+20%	Siklus 0	54.85	1.464
	Siklus 1	59.95	1.601
	Siklus 2	63.50	1.695
	Siklus 3	57.91	1.546
B25-K75+20%	Siklus 0	63.74	1.702
	Siklus 1	64.95	1.734
	Siklus 2	64.49	1.722
	Siklus 3	65.52	1.749

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

- i. Pada tanah lempung dengan penambahan pasir sebesar 20%, siklus basah-kering menyebabkan perubahan plastisitas tanah. Pengurangan batas cair lebih signifikan dibandingkan pengurangan batas plastis sehingga mengarah pada pengurangan indeks plastisitas. Semakin besar kadar bentonit pada lempung, semakin besar pula penurunan yang terjadi terhadap batas Atterberg akibat siklus basah-kering.
- ii. Terhadap siklus basah-kering, campuran dengan variasi dengan kadar bentonit B90-K10+20% mengalami kenaikan kekuatan geser sesaat namun kemudian mengalami penurunan yang tidak signifikan (mendekati konstan). Pada variasi dengan kadar kaolin yang lebih banyak, penambahan pasir justru menyebabkan penurunan kekuatan geser tak teralir.
- iii. Kekuatan geser variasi B25-K75+20% yang pada 0 siklus mencapai nilai tertinggi dibandingkan variasi lainnya namun kemudian mengalami penurunan yang lebih banyak dibandingkan dengan

lempung dengan kadar kaolin yang lebih sedikit. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa mineral kaolin lebih sensitif terhadap perlakuan siklus basah-kering dibandingkan mineral montmorilonit.

- iv. Penambahan pasir sebesar 20% sebagai aditif belum dapat dibuktikan efisiensinya untuk mereduksi potensi pengembangan tanah lempung ekspansif. Melalui penelitian ini hanya diperoleh bahwa potensi pengembangan akan berkurang sebanding dengan jumlah siklus basah-kering, walaupun pola perubahan potensi pengembangan tidak secara konsisten langsung mengalami penurunan, melainkan ada kenaikan pada siklus awal.
- v. Semua variasi tanah ekspansif yang ditambahkan pasir sebesar 20% memiliki kecenderungan untuk mengalami peningkatan potensi pengembangan pada awal siklus basah-kering, baru kemudian mengalami penurunan. Jumlah siklus yang dibutuhkan tiap variasi untuk mengalami penurunan berbeda-beda. Variasi dengan kadar bentonit dominan, yakni B90-K10+20% paling cepat mengalami penurunan potensi pengembangan (siklus 1) dibandingkan pada variasi dengan kadar bentonit yang lebih kecil, yaitu B75-K25+20% (siklus 2), B50-K50+20% (siklus 3), dan B25-K75+20% (belum terlihat adanya penurunan sampai siklus 3).
- vi. Siklus basah-kering menyebabkan agregasi dan deagregasi butir tanah sehingga mengakibatkan perubahan kuat geser dan potensi pengembangan. Agregasi atau deagregasi ditunjukkan dengan adanya perubahan angka pori. Setelah mengalami 3 siklus, agregasi dialami pada variasi B90-K10+20% dan variasi B75-K25+20%. Sedangkan deagregasi pada variasi B50-K50+20% dan variasi B25-K75+20% ditunjukkan dengan kenaikan angka pori
- vii. Pengurangan persentase pengembangan karena penambahan pasir pada siklus 0 bila dibandingkan dengan campuran murni yang dipadatkan dengan kadar air yang sama adalah sebesar 26% untuk B25-K75+20%, dan sebesar 43% untuk B50-K50+20%. Sedangkan variasi B75-K25+20% dan B90-K10+20% tidak dapat dibandingkan secara akurat walau tetap mengalami penurunan, karena data uji potensi pengembangan untuk campuran murni tidak tuntas dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Budi, G. S., Cristanto, A., Setiawan, E., (2003). Pengaruh Fly Ash Terhadap Sifat Pengembangan Tanah Ekspansif, *Dimensi Teknik Sipil*. **5**(1): 20-24.
- Hardiyati, S., (2003). *Studi Potensi Mengembang dan Kekuatan Tanah Lempung Ekspansif dengan dan tanpa Kapur Akibat Siklus Berulang Basah – Kering*. Tesis Magister. Universitas Diponegoro.
- Mitchell, J. K., (1992). *Fundamental of Soil Behavior*. John Wiley & Sons Inc., Berlekey.
- Seta, W. (2006). *Perilaku Tanah Ekspansif yang Dicampur dengan Pasir untuk Subgrade*, Tesis Magister, Universitas Diponegoro
- Sholihin, A. (1999). *Studi Perilaku Mengembang Tanah Lempung Ekspansif Akibat Siklus Berulang Basah-Kering*, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung.
- Setiawan, Y., (2011). *Studi Perilaku Kekuatan Geser dan Pengembangan Akibat Siklus Basah-Kering dengan Tanah Lempung Artifisial dari Variasi Kadar Mineral Kaolinite dan Bentonite*, Tesis Magister. Institut Teknologi Bandung.
- SK SNI 6424. (2008). Cara Uji Potensi Pengembangan atau Penurunan Satu Dimensi Tanah Kohesif, Badan Standarisasi Nasional.
- SK SNI 03-3638. (1994). Cara Uji Kuat Tekan Bebas Tanah Lempung, Badan Standarisasi Nasional.