

Studi Pengaruh Batas Atterberg Terhadap Kuat Geser Tanah Ekspansif dan Non Ekspansif

Arlyn Aristo Cikmit¹, Rangga Adiprima Sudisman¹, Wirman Hidayat^{1,*}, Bagus Guritno¹, Muhammad Brianjaya Andhika¹

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pertamina, Jakarta¹

Koresponden*, Email: wirman.hidayat@universitaspertamina.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	4 Maret 2024	<i>The shear strength test of expansive clay is commonly conducted at the optimum moisture content obtained from the Proctor test. However, the initial water content of natural soil is more likely to be around its plastic limit, liquid limit, or in-between. This study aims to examine the swelling index and undrained shear strength of expansive and non-expansive soils with the initial water content at their Atterberg limits (PL+5%, PL, PL-5%, LL+5%, LL and LL-5%). Swelling tests were performed using an oedometer, while shear strength tests were conducted using the laboratory vane shear test for low-consistency soils and a direct shear test for high-consistency soils. Results indicate that the undrained shear strength decreased with the higher initial water content, represented by linear gradients (A value) on a log-log graph. Expansive soils have an A value of 2.9-3.5, which is lower than the A value of 4.4-10.1 for non-expansive soils.</i>
Diperbaiki	26 Maret 2024	
Disetujui	21 Mei 2024	

Keywords: atterberg limit, undrained shear strength, expansive soil.

Abstrak
Pengujian kuat geser tanah ekspansif pada umumnya dilakukan pada kadar air optimum yang diperoleh dari uji Proctor. Namun kondisi kadar air tanah asli di lapangan lebih cenderung mendekati batas plastis, batas cair, atau diantaranya. Studi ini bertujuan untuk menguji karakteristik pengembangan dan kuat geser niralir jenis tanah ekspansif dan non ekspansif pada kadar air tanah yang berada pada batas-batas Atterbergnya (PL-5%, PL, PL+5%, LL-5%, LL and LL+5%). Pengujian pengembangan dilakukan menggunakan alat uji oedometer, sementara pengujian kuat geser dilakukan dengan menggunakan hasil *laboratory vane shear* bagi tanah lunak dan uji geser langsung bagi tanah kaku. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat geser niralir berkurang seiring dengan naiknya kadar air, gradien penurunan ditunjukkan oleh garis miring (nilai A) pada grafik log-log. Tanah ekspansif memiliki nilai A pada rentang 2,9-3,3 yang lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai A sebesar 4,4-10,1 pada tanah non-ekspansif.

Kata kunci: batas atterberg, kuat geser niralir, tanah ekspansif.

1. Pendahuluan

Tanah ekspansif berpotensi menjadi masalah serius pada banyak kasus kerusakan jalan raya dan ketidakstabilan struktur ringan. Istilah tanah ekspansif secara umum diberikan pada jenis tanah yang memiliki potensi susut dan mengembang yang dipengaruhi oleh perubahan kadar air [1]. Pada tahun 2019, pemerintah Indonesia melalui Kementerian Energi dan Sumber daya Mineral, Badan Geologi menunjukkan perhatian serius terhadap masalah tanah ekspansif ini dengan dikeluarkannya peta sebaran batuan lempung bermasalah yang berpotensi ekspansif di seluruh wilayah Indonesia [2], namun peta tersebut belum dilengkapi dengan informasi sifat mekanis batuan atau klasifikasi tanah ekspansif secara spesifik di setiap lokasinya. Beberapa peneliti melaporkan permasalahan stabilitas dan kerusakan infrastruktur jalan yang disebabkan oleh perilaku tanah ekspansif di beberapa wilayah di Indonesia diantaranya di Jawa Tengah [3], Jawa Barat [4], Banten [5], Aceh [6], Sulawesi Selatan [7], dan di

jaringan Jalan Nasional Pulau Jawa [8]. Kerusakan jalan dapat ditandai dengan retakan-retakan memanjang pada perkerasan di badan jalan [4], [8]. Di berbagai belahan dunia, tanah ekspansif juga menyebabkan permasalahan stabilitas dan kerusakan struktur yang dibangun di atasnya terutama rumah dan gedung bertingkat rendah [9]–[11].

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa permasalahan tanah ekspansif dapat diselesaikan dengan beberapa metode diantaranya perbaikan kimiawi dengan penambahan material seperti batu kapur [12], campuran batu kapur dengan abu sekam padi [13], dan semen [14] yang dapat meningkatkan stabilitas. Metode perbaikan lainnya adalah perbaikan mekanik dengan modifikasi struktural seperti penambahan serat pada tanah [14] maupun perkuatan struktural [15].

Meskipun ragam metode perbaikan telah ditawarkan dalam menyelesaikan masalah tanah ekspansif, namun pada

praktiknya penentuan karakteristik dan propertis tanah cenderung disadur atau dikorelasikan secara langsung dari hasil penelitian yang dilakukan bukan pada tanah asli di wilayah Indonesia. Sebagai negara tropis dengan curah hujan tinggi dan musim kemarau yang panjang, perubahan kondisi air tanah serta suhu yang relatif konstan tentunya akan menghasilkan tanah dengan karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan tanah berasal dari negara dengan empat musim yang memiliki iklim dan curah hujan yang berbeda. Selain itu asal-usul tanah ekspansif di Indonesia umumnya dihasilkan dari pelapukan batuan setempat yang sering kali dikenal dengan tanah residual yang pada prinsipnya berbeda dengan tanah sedimentasi. Akibatnya, pada penentuan klasifikasi tanah lempung ekspansif tersebut tidak jarang terdapat perbedaan hasil yang didapatkan yang disebabkan oleh penggunaan metode penentuan yang beragam dan tidak semuanya sesuai dengan karakteristik tanah yang diuji. Untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan kajian lebih lanjut terhadap karakteristik tanah ekspansif di wilayah Indonesia.

Terbatasnya hasil penelitian dalam mengamati pengaruh kuat geser tanah langsung terhadap perubahan kuat geser tanah ekspansif mengharuskan penggunaan faktor reduksi yang cukup konservatif dalam menentukan nilai kuat geser niralirnya. Sering kali dalam konstruksi jalan raya, nilai kuat geser tanah diuji melalui nilai *California Bearing Ratio* (CBR) dalam kondisi basah maupun kering. Begitupun halnya untuk tanah ekspansif, kekakuan tanah hanya ditentukan dalam nilai persen terhadap rasio perbandingan nilai penetrasi standar California [16]. Dalam penelitian ini, tanah ekspansif dan non-ekspansif diuji kuat gesernya dengan variasi kadar air mengikuti batas plastis dan batas cairnya. Melalui penelitian ini, perbandingan antara penentuan kategori potensi ekspansivitas melalui metoda *activity ratio* dan *swelling index* dilakukan, serta perilaku kuat geser pada batas plastis dan batas cair tanah ekspansif dan non-ekspansif dianalisis perbandingannya.

2. Metode

Sampel tanah terganggu dikumpulkan dari tiga lokasi dan masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda. Sampel yang dipilih merupakan sampel tanah dengan karakteristik ekspansif dan non ekspansif yang ditentukan melalui uji fisik dan klasifikasi menggunakan angka *activity ratio*. Untuk setiap sampel tanah dilakukan pengujian karakteristik fisik standar di laboratorium, yaitu uji kadar air natural, uji berat jenis, uji batas-batas atterberg, dan uji gradasi butiran tanah. Kemudian berdasarkan hasil pengujian batas-batas Atterberg, kadar air tanah pengujian dimodifikasi terhadap batas cair (LL) dan batas plastisnya (PL) dengan kadar air PL-5%,

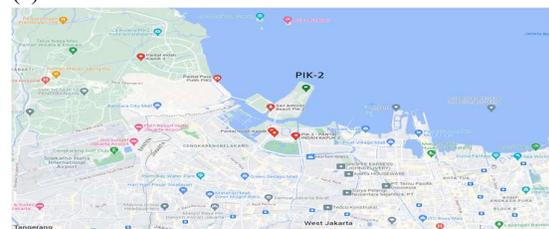
PL dan PL+5% dan terhadap batas cair LL-5%, LL dan LL+5% terhadap batas plastisnya. Selanjutnya benda uji dengan kadar air yang sudah dimodifikasi tersebut diuji kuat gesernya menggunakan alat uji *laboratory vane shear* dan alat uji kuat geser langsung. Pengujian kuat geser dilakukan menggunakan *laboratory vane shear test* untuk tanah dengan kadar air pada sekitar batas cairnya, dan menggunakan uji kuat geser langsung untuk tanah dengan kadar air pada sekitar batas plastisnya. Setelah itu, untuk masing-masing benda uji dilanjutkan dengan uji *one dimensional swell* dan uji *expansion index* (EI) untuk mengetahui sifat pengembangannya.

Sampel Tanah

Penelitian ini dilakukan terhadap benda uji tanah permukaan yang diambil dari kedalaman 0-3 meter pada tiga lokasi yaitu: (1) Kabupaten Boyolali, Provinsi Jawa Tengah, (2) Pantai Indah Kapuk (PIK) 2 Jakarta Utara, Provinsi DKI Jakarta dan (3) Kabupaten Batang, Provinsi Jawa Tengah seperti terlihat pada **Gambar 1**. Selanjutnya sampel disebut dengan tanah Boyolali, tanah PIK 2 dan tanah Batang. Hasil pengujian karakteristik fisik dan klasifikasi ketiga jenis tanah ditunjukkan pada **Tabel 1**. Secara umum tanah di ketiga lokasi memiliki kadar air natural (w_n) cukup tinggi pada rentang 40-51% dengan tingkat saturasi $S_r > 70%$ hingga mendekati jenuh yaitu $S_r = 98%$ bagi tanah Batang. Tanah Boyolali dan PIK-2 memiliki nilai *specific gravity* yang mirip yaitu 2,59 dan 2,58,



(a)



(b)

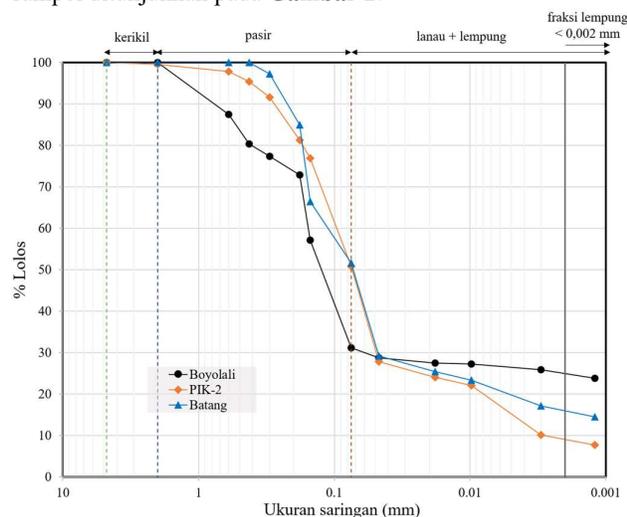
Gambar 1. Titik lokasi pengambilan tanah. (a) Batang dan Boyolali, (b) Pantai Indah Kapuk 2

Tabel 1. Karakteristik fisik dan klasifikasi tanah

Sampel	Karakteristik Fisik					Distribusi Ukuran Butir				Batas Atterberg			Klasifikasi (USCS)
	w_n (%)	S_r (%)	γ_m (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	G_s	Kerikil (%)	Pasir (%)	Butir Halus (%)	< 2 μ m (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	
Boyolali	40,49	71	1,44	1,03	2,59	0	69	31	26	65,02	30,37	35,65	SC
PIK-2	41,4	84	1,58	1,12	2,58	0	49	51	10	54,95	21,81	33,14	CH/OH
Batang	51,0	98	1,60	1,06	2,47	0	48	52	17	57,28	47,78	9,50	MH/OH

sedangkan tanah Batang memiliki nilai *specific gravity* yang jauh lebih rendah yaitu sebesar 2,47.

Berdasarkan hasil analisis distribusi butiran, tanah Boyolali didominasi oleh butiran kasar berupa pasir sebanyak 69% serta memiliki kandungan fraksi lempung (ukuran < 2 μ m) yang cukup tinggi sebesar 26% sehingga dikategorikan sebagai tanah pasir berlempung atau *clayey sand* (SC). Distribusi butiran berbeda ditunjukkan oleh tanah PIK-2 dan Batang yang memiliki butiran halus (lanau dan lempung) sedikit lebih banyak dari butiran kasarnya. Dari 51% kandungan butir halus di PIK-2, 10 % diantaranya adalah fraksi lempung. Sedangkan tanah Batang mengandung 17% fraksi lempung. Kurva distribusi ukuran butiran tanah untuk ketiga sampel ditunjukkan pada **Gambar 2**.

**Gambar 2.** Kurva distribusi butiran tanah

Berdasarkan hasil pengujian batas-batas Atterberg dapat dilihat bahwa ketiga tanah memiliki nilai batas cair yang cukup tinggi dan relatif seragam di rentang 54%-65% namun memiliki nilai batas plastis yang beragam di rentang 21%-48% sehingga nilai indeks plastisitasnya juga bervariasi. Tanah Boyolali dan PIK-2 memiliki nilai indeks plastisitas (PI) cukup tinggi sebesar 35,65% dan 33,14%, sedangkan tanah Batang memiliki plastisitas relatif rendah sebesar 9,5%.

Berdasarkan kriteria USCS terhadap ukuran butir dan sifat plastisitasnya maka tanah PIK-2 dikategorikan sebagai *clay with high plasticity* (CH) sedangkan tanah Batang dikategorikan sebagai *silt with high plasticity* (MH). Keberadaan lempung dan sifat plastisitas inilah yang akan memberikan pengaruh terhadap potensi ekspansivitas masing-masing jenis tanah.

Pengujian potensi ekspansivitas tanah

Pengujian besar angka pengembangan tanah dilakukan melalui dua pengujian yaitu uji *one dimensional swell* dan uji *expansion Index*. Uji pengembangan satu dimensi dilaksanakan berdasarkan ASTM D4546-14 *Standard test method for one-dimensional swell or collapse of soil*. Uji pengembangan dilakukan menggunakan metode A dengan tanah yang dibentuk kembali (*remolded*). Sampel tanah yang digunakan disaring terlebih dahulu untuk lolos ukuran saringan 4.75 mm, dicetak ulang dalam cincin konsolidometer, kemudian dijenuhkan dan diukur nilai pengembangan vertikalnya menggunakan *dial gauge*. Pembebanan yang digunakan konstan pada 1 kPa untuk semua jenis sampel tanah. Besarnya *swell strain* pengembangan ditentukan berdasarkan persamaan (1).

$$\varepsilon_s = \frac{100\Delta h_2}{h_1} \quad (1)$$

dimana ε_s = regangan pengembangan, Δh_2 = penambahan tinggi sampel setelah direndam, dan h_1 adalah tinggi awal sampel.

Uji *expansion Index* pada sampel tanah dilakukan berdasarkan ASTM D4829. Sampel uji dikeringkan terlebih dahulu di dalam oven dengan suhu 30°C selama 24 jam. Sampel kering udara tersebut memiliki kadar air pada rentang 5-7%, kemudian air ditambahkan agar tanah mencapai nilai derajat saturasi pada rentang 40%-60%. Selanjutnya tanah diletakkan pada alat oedometer tanpa dijenuhkan dan diberi tegangan awal sebesar 6,9 kPa selama 10 menit. Tanah selanjutnya dijenuhkan di dalam cincin konsolidometer yang ditambahkan air dan diukur penambahan deformasi vertikalnya selama 24 jam atau hingga penambahan deformasi vertikalnya tidak lebih dari 0,0005 mm/jam.

Pengujian kuat geser tanah

Sebelum dilakukan pengujian kuat geser tanah, sampel tanah disiapkan dengan kondisi kadar air mengacu pada batas-batas Atterberg, yaitu $w = PL-5\%$, $PL+5\%$, $LL-5\%$ dan $LL+5\%$. Sampel tanah terlebih dahulu dikeringkan pada suhu $30^\circ C$ selama 24 jam, diukur kadar air setelah pengeringan, dan kemudian ditambahkan air untuk mencapai kadar air rencana. Setelah mencapai kondisi kadar air rencana yang bervariasi, masing-masing sampel tanah kemudian dibentuk dalam cetakan silinder dengan dimensi diameter = 37,5 mm dan tinggi 75 mm. Untuk setiap kondisi kadar air yang berbeda disiapkan masing-masing 2 sampel (pengujian duplo). Sampel yang sudah dicetak kemudian diuji kuat gesernya menggunakan alat uji geser langsung untuk sampel dengan konsistensi kaku yaitu sampel dengan kadar air $PL-5\%$ dan $PL+5\%$. Pengujian kuat geser langsung menggunakan kecepatan regangan 1 mm/menit, tegangan normal pada angka 0,16, 0,32, dan 0,64 kg/cm^2 , dan dicatat grafik hubungan tegangan terhadap regangan nya. Sedangkan untuk sampel dengan kadar air $LL-5\%$ dan $LL+5\%$ diuji menggunakan *laboratory vane shear* (LVS). Pengujian LVS dilakukan dengan kecepatan rotasi 6° /menit.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasi uji ekspansivitas

Tanah telah terlebih dahulu dilakukan analisis potensi pengembangannya berdasarkan kriteria ekspansivitas [17], yaitu dengan penentuan rasio aktifitas yang ditentukan dalam persamaan (2).

$$A_c = \frac{PI}{CF} \quad (2)$$

dengan A_c adalah potensi pengembangan yang ditentukan dari rasio nilai PI terhadap persen FC atau fraksi lempung nya (tanah dengan ukuran $< 2 \mu m$). Tanah dengan nilai $A_c < 0,75$ dikategorikan sebagai tanah tidak aktif, tanah dengan $0,75 < A_c < 1,25$ dikategorikan sebagai tanah normal, dan tanah dengan $A_c > 1,25$ dikategorikan sebagai tanah aktif. Penentuan potensi pengembangan dan hasil uji ekspansivitas tanah di tiga lokasi ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Hasil uji pengembangan satu dimensi menunjukkan bahwa sampel tanah Boyolali dan tanah PIK-2 dikategorikan sebagai tanah ekspansif dengan nilai *swell strain*, $\varepsilon_s = 26,7\%$ dan $8,1\%$. Sedangkan untuk tanah yang diambil dari lokasi di Batang dikategorikan sebagai tanah non-ekspansif dengan nilai $\varepsilon_s = 0,7\%$. Hasil uji indeks ekspansivitas menunjukkan bahwa sampel tanah Boyolali memiliki nilai $EI = 108,01$ sampel tanah PIK-2 memiliki nilai 51,11, sedangkan pada tanah Batang tidak dilakukan pengujian.

Tabel 2. Potensi pengembangan dan hasil uji indeks ekspansivitas

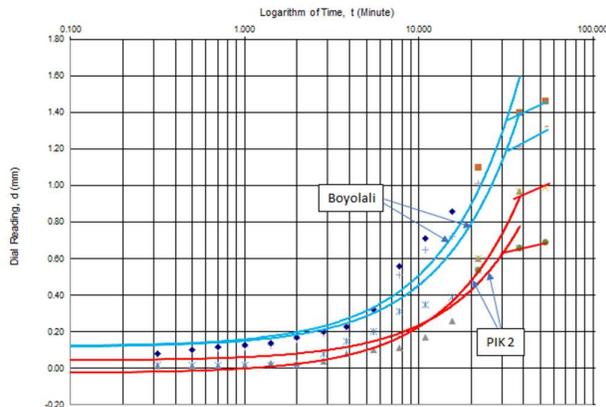
Sampel	A_c Skempton	$1-D$ Swell (%)	EI
Boyolali	0,99 (Sedang)	26,7	108,0
PIK-2	3,31 (Sangat Tinggi)	8,1	51,11
Batang	0,56 (Rendah)	0,7	NA

Perbandingan hasil penentuan potensi pengembangan berdasarkan *activity ratio* dan hasil pengujian pengembangan satu dimensi menunjukkan hasil yang selaras dalam menentukan sampel tanah sebagai tanah ekspansif atau non-ekspansif. Tanah Boyolali dan PIK-2 dikategorikan sebagai tanah dengan potensi ekspansif sedang dan sangat tinggi, sedangkan tanah Batang ditentukan memiliki potensi pengembangan rendah. Meskipun hasil analisis sederhana berdasarkan nilai indeks plastisitas, PI dan persentase butiran lempung, CF sudah dapat menentukan kategori suatu sampel tanah bersifat sebagai tanah ekspansif atau non-ekspansif, besaran pengembangan sendiri tidak dapat direpresentasikan hanya melalui nilai A_c itu sendiri. Lebih jauh lagi, meskipun tanah PIK-2 memiliki nilai A_c lebih tinggi (3,31) daripada sampel tanah Boyolali (0,99), namun nilai pengembangan tanah PIK-2 (8,1%) tidak lebih besar dari pengembangan sampel tanah Boyolali (26,7%).

Hasil uji pengembangan satu dimensi juga diperkuat dengan nilai indeks ekspansivitas yang menunjukkan hasil selaras bahwa sampel tanah Boyolali (108,01) memiliki indeks ekspansivitas lebih tinggi dibandingkan dengan tanah PIK-2 (51,11) sehingga tanah Boyolali dikategorikan sifat ekspansif tinggi sedangkan sampel tanah PIK-2 dikategorikan sebagai tanah ekspansif sedang. Atas dasar hasil ini, dapat disimpulkan bahwa metoda penentuan potensi pengembangan hanya dapat dijadikan acuan sebagai penentu apakah sampel tanah ekspansif atau non-ekspansif, namun besar pengembangan sendiri harus tetap dilanjutkan dengan uji pengembangan satu dimensi atau uji indeks ekspansivitas.

Gambar 3 menunjukkan grafik hubungan antara pengembangan terhadap waktu selama 24 jam yang diperoleh berdasarkan pengujian indeks ekspansivitas. Besar maksimum pengembangan untuk sampel tanah Boyolali adalah 142 mm, sedang untuk sample tanah PIK 2 pengembangan maksimum adalah 100 mm. Meskipun pada kurva terlihat bahwa nilai pengembangan untuk tanah Boyolali lebih besar daripada nilai pengembangan sampel tanah PIK-2, namun pola kenaikan pengembangan terlihat relatif sejajar antara satu sama lain. Hal ini sangat mungkin disebabkan oleh kecepatan alir air yang relatif sama antara dua sampel tersebut. Meskipun demikian, penjelasan fenomena tersebut

masih perlu dibuktikan melalui pengujian permeabilitas tanah dengan metoda seperti *constant head* atau *falling head permeability test*.



Gambar 3. Kurva semi log waktu terhadap pengembangan

Hasil Uji Kuat Geser

Besarnya kuat geser niralir sampel dari tiga lokasi dengan variasi kadar air pengujian ditunjukkan pada **Tabel 3** di bawah ini. Sampel tanah Boyolali dan PIK-2 memiliki enam variasi kadar air yaitu; $w = PL, PL-5\%, PL+5\%, LL, LL-5\%$ dan $LL+5\%$. Sedangkan sampel tanah Batang hanya memiliki 5 variasi kadar air. Hal ini disebabkan karena nilai LL dan PL yang berdekatan sehingga nilai $PL +5\%$ dan $LL-5\%$ memiliki nilai yang berhimpit sehingga hanya diuji sebagai satu sampel menggunakan LVS.

Gambar 4 memperlihatkan grafik hubungan kuat geser niralir sampel terhadap variasi kadar air pada batas-batas Atterberg. Secara umum hasil uji menunjukkan bahwa kuat geser niralir berkurang dengan cukup signifikan seiring dengan meningkatnya kadar air. Masing-masing jenis tanah memiliki *trendline* hubungan yang kuat dengan fungsi logaritmik antara kuat geser dan kadar airnya dengan nilai koefisien determinasi, $R^2=0,88-0,98$. Pada batas plastisnya ($PL+5\%$ dan $PL-5\%$), kuat geser untuk setiap sampel berada pada rentang 20,14-61,57 kPa, sedangkan pada batas carinya ($LL +5\%$ dan $LL-5\%$), kuat geser tanah berada pada rentang 1,27-7,23 kPa.

Tabel 3. Kuat Geser Tanah pada Variasi Kadar air

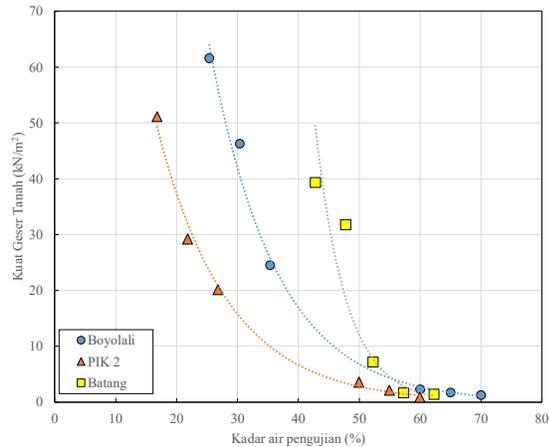
Sampel	Kadar Air Pengujian (%)	Rerata Kuat Geser niralir (kN/m ²)
Boyolali	PL-5%	25,37
	PL	30,37
	PL+5%	35,37
	LL-5%	60,02

PIK-2	LL	65,02	1,75
	LL+5%	70,02	1,27
	PL-5%	16,81	51,13
	PL	21,81	29,21
	PL+5%	26,81	20,14
	LL-5%	49,95	3,58
Batang	LL	54,95	2,11
	LL+5%	59,95	0,89
	PL-5%	42,78	39,35
	PL	47,78	31,80
	LL-5%	52,28	7,23
	LL	57,28	1,71
	LL+5%	62,28	1,46

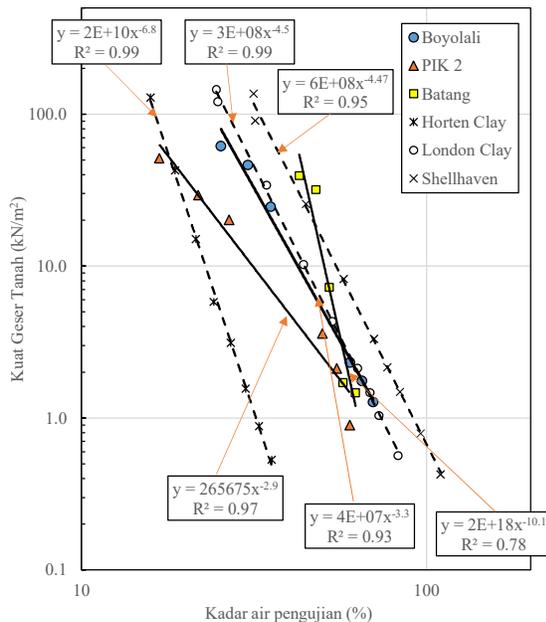
Hasil uji kuat geser terhadap variasi kadar air pada batas-batas Atterberg menunjukkan bahwa untuk semua jenis tanah baik ekspansif (Boyolali dan PIK 2) maupun non ekspansif (Batang), nilai kuat geser tanah mengalami penurunan dengan fungsi logaritmik terhadap penambahan kadar air tanah. Hal serupa ditunjukkan pula pada studi [18] dimana turunnya kuat geser niralir yang terjadi akibat naiknya kadar air terjadi akibat butiran tanah yang semula kaku pada daerah plastisnya kehilangan kontak antar butiran tanah dengan naiknya kadar air yang mendekati atau melewati batas cairnya.

Pada kondisi kadar air 40-50% tanah Batang memiliki konsistensi dan kekuatan lebih tinggi jika dibandingkan dengan tanah Boyolali dan PIK-2. Hal ini disebabkan karena tanah Batang masih dalam kondisi batas plastis ($PL=47,78\%$) sedangkan tanah PIK-2 dan Boyolali sudah mendekati batas carinya ($LL=54,9\%-65,02\%$). Namun kekuatan ketiganya relatif seragam sangat rendah pada kondisi kadar air di atas 55% yang mana besar kemungkinan ketiga sampel tanah sudah dalam kondisi jenuh air. Dalam kondisi jenuh, penambahan lebih banyak air terhadap sampel *remolded* akan meningkatkan angka pori sehingga kekuatan tanah semakin dipengaruhi oleh koloid lempung yang bersifat cair.

Gambar 4 juga menunjukkan perilaku yang berbeda pada kedua tanah ekspansif Boyolali dan PIK-2. Pada kondisi kadar air $w = PL-5\%, PL$ dan $PL+5\%$, tanah Boyolali memiliki kuat geser yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah PIK-2. Namun seiring dengan meningkatnya kadar air sampai dengan kondisi batas cair $w = LL-5\%, LL$, dan $LL+5\%$, kuat geser tanah Boyolali dan PIK 2 turun secara signifikan. Jika dibandingkan terhadap dengan nilai pengembangan dan indeks pengembangan, tanah Boyolali yang memiliki nilai EI lebih tinggi ($EI=108,11$) akan mengalami reduksi kekuatan yang lebih besar jika dibandingkan dengan tanah PIK-2 dengan nilai indeks ekspansivitas yang lebih kecil ($EI=51,11$)



Gambar 4. Hubungan antara kuat geser nirlair terhadap kadar air pengujian pada batas-batas Atterberg-nya.



Gambar 5. Hubungan kadar air dan kuat geser tanah pada grafik log-log dengan tambahan data tanah lempung Horten London dan Shellhaven [18], [19].

Gambar 5 menunjukkan hubungan kadar air dan kuat geser sampel Boyolali, PIK 2 dan Batang, serta tambahan data tanah Horten, London dan Shellhaven [18], [19] dalam grafik log-log. Data yang ditunjukkan oleh [19] memperlihatkan data tanah sedimen, sedangkan data yang diuji dalam studi kali ini merupakan tanah residual yang terbentuk dari proses pelapukan tanah. Terlihat jelas meskipun berbeda jenis pembentukannya, untuk semua jenis tanah baik sedimen maupun residual, hubungan kadar air dan kuat gesernya memiliki hubungan linear dalam grafik log-log. Namun,

perbedaan yang signifikan terdapat pada gradien yang dibentuk oleh masing-masing jenis tanah yang menunjukkan besarnya pengaruh kadar air terhadap kuat geser pada batas-batas Atterberg-nya. Gradien garis regresi didapat dari nilai eksponen persamaan regresinya dan dinyatakan sebagai nilai absolut A. Tanah Boyolali, PIK-2 dan Batang memiliki nilai $A = 3,3; 2,9$ dan $10,1$, sedangkan pada tanah Horten, London, dan Shellhaven, $A = 6,8; 4,5$ dan $4,4$. Berdasarkan kemiringan yang dibentuk oleh tiap garis regresi, tanah ekspansif yaitu tanah PIK-2 dan Boyolali menunjukkan kemiringan $2,9-3,3$ yang mana lebih kecil dibandingkan dengan tanah non-ekspansif yang memiliki nilai $A=4,4-10,1$. Nilai gradien tersebut menunjukkan bahwa variasi kadar air pada batas-batas Atterberg memiliki pengaruh lebih kecil terhadap perubahan kuat geser tanah ekspansif bila dibandingkan dengan tanah non-ekspansif.

4. Simpulan

Melalui hasil pengujian, analisis dan diskusi yang telah dilakukan pada tanah di tiga lokasi, telah diambil beberapa simpulan diantaranya:

1. Sampel tanah Boyolali, PIK 2 dan Batang berturut-turut dikategorikan sebagai tanah ekspansif sedang, ekspansif tinggi dan non ekspansif dengan nilai EI yaitu $108,01; 51,11$ dan NA.
2. Nilai kuat geser tanah mengalami penurunan dengan fungsi logaritmik terhadap penambahan kadar air tanah.
3. Pada $w=40-50\%$, tanah Batang memiliki konsistensi dan kuat geser lebih baik jika dibandingkan dengan tanah Boyolali dan PIK-2 karena nilai batas plastisitas (PL) tanah Batang yang mendekati nilai batas cair (LL) tanah Boyolali dan PIK 2.
4. Dalam bentuk grafik log-log, hubungan kadar air tanah terhadap kuat geser tanah ekspansif dan non ekspansif dapat dihubungkan melalui garis linear. Besarnya tingkat penurunan kuat geser terhadap kadar air ditunjukkan melalui gradiennya yaitu dengan angka gradien, $A = 2,9-3,3$ untuk tanah ekspansif dan $A = 4,4-10,1$ untuk tanah non ekspansif. Nilai gradien tersebut menunjukkan bahwa variasi kadar air pada batas-batas Atterberg memiliki pengaruh lebih kecil terhadap perubahan kuat geser tanah ekspansif bila dibandingkan dengan tanah non-ekspansif.

Ucapan Terima Kasih

Kegiatan penelitian ini didukung oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) melalui Pendanaan

Program Riset Keilmuan Tahun 2021 dengan nomor kontrak hibah 091/E4.1/AK.04.RA/2021.

Daftar Pustaka

- [1] J. Nelson and D. Miller, *Expansive Soils, Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. USA: John Willey & Sons, Inc, 1992.
- [2] T. Pramudyo *et al.*, *ATLAS Sebaran Batu Lempung Bermasalah Indonesia*, 1st ed. Bandung, 2019.
- [3] A. S. Muntohar, "The Swelling of Expansive Subgrade At Wates-Purworejo Roadway Sta. 8 127," *Civ Eng Dimens*, vol. 8, no. 2, pp. 106–110, 2006.
- [4] R. G. Yahya, "Kerusakan Jalan Raya Akibat Tanah Mengembang," *J. Tek. Sipil*, vol. 11, no. 1, 2015.
- [5] D. Ishak, W. Hidayat, R. A. Sudisman, and A. Aristo, "Swelling Prediction of Expansive Soil Using Numerical Method Analysis," *Indones. Geotech. J.*, vol. 1, no. 3, pp. 29–36, 2022.
- [6] M. Munirwansyah and R. P. Munirwan, "Stabilization On Expansive Soil For Road-Subgrade For Geotechnic Disaster Approach," *Int. J. Disaster Manag.*, vol. 1, no. 1, pp. 8–19, 2017.
- [7] E. A. R. Dendo, "Stabilisasi Tanah Lempung Sebagai Subgrade Dengan Memanfaatkan Kapur Padam Asal Kabupaten Pangkep," *J. Dyn. Saint*, vol. 2, no. 1, 2018.
- [8] D. Affandi, "Mapping Expansive Soil Characteristics on The National Road Segment in Java Island," in *25rd Annual National Conference on Geotechnical Engineering*, 2021, pp. 361–372.
- [9] B. Lew, "Structure Damage Due to Expansive Soils: A Case Study," *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 1317–1324, 2010.
- [10] I. G. . Wardana and S. Dwipa, "Analisis Penyebab Kerusakan Rumah Sederhana yang Didirikan di Atas Tanah Lempung di Daerah Kerobokan," *J. Ilm. Tek. Sipil*, vol. 16, no. 2, pp. 177–185, 2012.
- [11] M. Zumrawi, A. E. A. Gamel, and A. Abdelmarouf, "Damages of Buildings on Expansive Soils: Diagnosis and Avoidance," *Int. J. Multidiscip. and Scientific Emerging Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 108–116, 2017.
- [12] M. Al-Mukhtar, A. Lasledj, and J. F. Alcover, "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C," *Appl Clay Sci*, vol. 50, no. 2, pp. 191–198, 2012.
- [13] A. S. Muntohar and R. Hashim, "A Study of Expansive Clay Treated With LRHA," in *2nd World Engineering Congress*, 2002, pp. 77–80.
- [14] A. R. Estabragh, H. Rafatjo, and A. A. Javadi, "Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques," *Geosynth Int*, vol. 21, no. 3, pp. 233–243, 2014.
- [15] S. Liu, F. Bai, Y. Wang, S. Wang, and Z. Li, "Treatment for Expansive Soil Channel Slope with Soilbags," *J. Aerosp. Eng*, vol. 26, no. 4, pp. 657–666, 2013.
- [16] A. S. Muntohar, "The Swelling of Expansive Subgrade at Wates Purworejo Roadway, STA. 8+127," *Civ. Eng. Dimens.*, vol. 8, no. 2, pp. 106–110, 2006.
- [17] A. W. Skempton, "The Colloidal 'Activity' of Clays," *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 88, no. 3, pp. 57–61, 1962.
- [18] A. W. Skempton and R. Northey, "The sensitivity of clays," *Geotechnique*, vol. 3, no. 1, pp. 30–53, 1953.
- [19] B. Sharma and P. K. Bora, "Plastic Limit, Liquid Limit and Undrained Shear Strength of Soil- Reappraisal," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 129, no. 8, pp. 774–777, 2003.

Halaman ini sengaja dikosongkan