Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil **ISSN Print 2685-7553**
Vol. 9 No. 2 Agustus 2025 **ISSN Online 2581-1134**

Analsis Uji Sifat Fisis dan Mekanis Tanah *Clay Shale* Yang Distabilisasi Dengan Penambahan Kapur dan *Fly Ash*

Fuad Harwadi[1], Hasrullah[2*], Dana Febriansyah[3]

[1,2,3] Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan
e-mail: [*2]hasrullah.ray@borneo.ac.id

Abstract

Clay shale soils have properties that are very easily weathered or weakened in a relatively short time when reacting with air and water. Therefore, it needs to be stabilized to improve its technical properties and bearing capacity. This study aims to determine the optimal percentage of fly ash and lime addition as stabilizer materials. The addition of stabilizer to soil samples was carried out by varying the percentage of addition of 15%, 20% and 25% with variations in the length of curing time for 14, 21 and 28 days. Furthermore, physical and mechanical properties were tested in the form of CBR and UCT tests. The test results showed a change in soil grain size where there was an increase in sand content and a decrease in clay content in all samples. This occurs due to the pozzolanic process. The addition of stabilizer also affects the increase in CBR and UCT test values, where the most optimal increase occurs in the addition of 15% stabilizer with 28 day curing period. The CBR value increased by 110% while the UCT value was 38.25 kg/cm^2 from the initial condition

Keywords: *Clay shale, CBR, lime, stabilizer, soft clay*

Abstrak

Tanah Clay shale mempunyai sifat yang sangat mudah lapuk atau melemah dalam waktu yang relatif singkat apabila bereaksi dengan udara maupun air. Oleh karena itu, perlu di stabilisasi untuk meningkatkan sifat teknis dan daya dukungnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui persentase penambahan fly ash dan kapur yang optimal sebagai bahan stabilizer. Penambahan stabilizer pada sampel tanah dilakukan dengan memvariasikan presentase penambahan sebesar 15%, 20% dan 25% dengan variasi lama waktu pemeraman selama 14, 21 dan 28 hari. Selanjutnya dilakukan pengujian sifat fisik dan mekanik berupa uji CBR dan UCT. Dari hasil pengujian menunjukkan terjadinya perubahan ukuran butiran tanah dimana terjadi peningkatan kadar pasir dan penurunan kadar lempung pada semua sampel. Hal ini terjadi karena adanya proses pozzolan. Penambahan stabilizer juga berpengaruh terhadap peningkatan nilai uji CBR dan UCT, dimana peningkatan paling optimal terjadi pada penambahan stabilizer 15% dengan masa pemeraman 28 hari. Nilai CBR meningkat sebesar 110% sedangkan nilai UCT sebesar 38,25 kg/cm^2 dari kondisi awal.

Kata kunci: *Clay shale, CBR, kapur, stabilizer, UCT*

1. Pendahuluan

Tanah merupakan material yang memegang peranan penting dalam pembangunan infrastruktur, karena tanah berfungsi untuk menopang beban konstruksi. Maka dari itu diperlukan tanah yang mempunyai daya dukung yang baik. Di wilayah Kalimantan Utara terdapat jenis tanah yang cukup unik dan kompleks, yaitu tanah *clay shale*. *Clay shale* mempunyai sifat teknis yang cukup menarik, terutama karena mudah terjadi pelapukan atau pelemahan tanah *clay shale* dalam waktu yang relatif singkat.

Banyak permasalahan yang terjadi pada kontruksi sipil yang berdiri pada lapisan tanah *Clay shale.* Beberapa proyek kontruksi gedung maupun jalan mengalami keruntuhan saat proses pembangunan sedang berlangsung dan beberapa kasus terjadi setelah pembangunan selesai. Kasus-kasus kerusakan kontruksi disebapkan tanah *Clay shale* pada wilayah Indonesia di antaranya jalan Tol Semarang – Bawen pada tahun 2015, Wisma Atlet Hambalang pada tahun 2013, tahun 2006 pada jalan Tol Cipularang, jalan Tol Cisomang pada tahun 2017, jalan Tol Penggaron pada tahun 2015 (Adisurya & Makarim, 2022) dimana semua kasus pada tanah *Clay shale* terjadi longsor yang menyebabkan pergeseran struktur utama kontruksi, retak, sehingga terjadinya kegagalan daya dukung pondasi.

Belviso, 1977 (dalam Ariesnawan, 2015) melakukan penelitian dan menyatakan hasil dari uji *slake durability* pada sampel tanah *Clay shale* menunjukan hasil indeks sangat rendah. *Clay shale* termasuk dalam batuan elastik sedimen halus yang memiliki campuran dari lumpur, Menurut Blatt dan Robbert, 1966 (dalam Alatas Idrus M, 2020) c*lay shale* memiliki kadungan mineral berupa lempung maupun serpihan kecil lanau berukuran butiran, terutama pada mineral kuarsa dan kalsit. Salah satu ciri-ciri *Clay shale* berupa patahan memanjang yang berlapis lapis dengan ketebalan ukuran kurang dari 1 cm '*Fissility'* dan sifat *Fissilty* ini tidak terdapat pada batuan lumpur lainya yang memiliki komposisi yang sama. Karakteristik *Clay shale* yang umum terdiri dari beberapa lapis tipis yang tidak beraturan, mudah dipisahkan sepanjang bidang lapis, dan sangat licin. Irsyam, 2006 (dalam Ariesnawan, 2015) mengatakan bahwa terdapat lapisan *Clay shale* pada daerah pengembangan yang akan menyebabkan ketidakstabilan tanah meskipun berada pada kontur yang datar.

Clay shale merupakan salah satu jenis batuan lumpur yang mengandung *Montmorillonite*. Pada penelitian yang dilakukan Adisurya dan Makarim (2022) dijelaskan bahwa salah satu material penyusun *clay shale* adalah *Montmorillonite*. Pada penelitian pada kasus tanah *Clay shale* Semarang-Bawen dan *clay shale* Hambalang dilakukan uji mineralologi dengan menggunakan X-Ray Defraction dan SEM (*Scanning Electron Microscope*), dari pengujian ini diketahui bahwa kedua sampel ini mempunyai mineralogi yang berbeda. *Clay shale* Semarang-Bawen, komposisi mineral utamanya adalah *Smektit* 50%, sedangkan c*lay shale* Hambalang, komposisi mineral utamanya adalah *Kaolinite* 30% dan *Clorit* 20%. Karbon utama di Semarang-Bawen adalah *Calsit* 30%, sedangkan di proyek Hambalang adalah *Siderit* 6%.

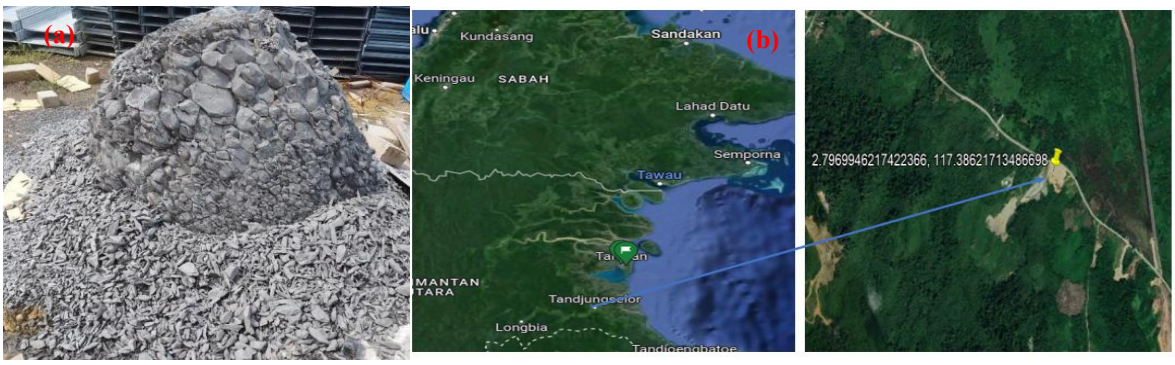
Sifat material *clay shale* yang tidak stabil atau mudahnya terjadi pelapukan apa bila bereaksi dengan udara dan air. Di daerah beriklim tropis, proses ini lebih sering terjadi dibandingkan dengan kondisi iklim lainnya. Perilaku rekayasa utama *clay shale* sangat sulit diidentifikasi, namun *clay shale* akan berubah menjadi lempung lunak (lumpur) jika terkena sinar matahari, udara dan air. Akan tetapi, menurut Alatas, dkk (2016) tanah *clay shale* akan memiliki kuat geser yang sangat baik jika ditutupi dengan lapisan tanah yang tebal sehingga tidak terjadi kontak langsung antara *clay shale* dengan sinar matahari, air dan udara. Oleh karena itu, diperlukan suatu upaya untuk memperbaiki sifat dan kekuatan tanah *clay shale*, khususnya pada material *clay shale* yang telah mengalami proses pelapukan.

Stabilisasi tanah merupakan sebuah metode perbaikan tanah dengan mencampurkan beberapa bahan kedalam tanah bertujuan untuk meningkatkan parameter tanah sesuai dengan kebutuhan, guna meningkatkan daya dukung tanah. Ada berbagai macam contoh bahan tambahan diantara semen, f*ly ash*, dan kapur dan lainnya. Pada penelitian ini digunakan *fly ash* yang merupakan hasil dari sisa pembakaran batu bara, yang dicampur dengan kapur dengan komposisi yang telah diperhitungkan.

Pemakaian kapur dan pemanfaatan limbah *fly ash* membuka peluang untuk dimanfaatkan di bidang konstruksi khususnya pada perbaikan tanah *clay shale* sebagai tanah dasar (*subgrade*) atau sebagai tanah timbunan (Susanto, 2021). Melalui penelitian ini, diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh pemanfaatan kapur dan dan limbah *fly ash* dalam meningkatkan daya dukung tanah

2 . Metode Penelitian

Tanah *Clay Shale* diperoleh di sebuah proyek yang terletak di jalan poros Gunung Seriang, Tanjung Selor, Kabupaten Bulungan, Kalimantan Utara. Tanah c*lay shale* yang digunakan sebagai bahan penelitian merupakan tanah terganggu dimana benda uji telah terpapar selama kurang lebih satu tahun. Hal ini menyebabkan sampel tanah *clay shale* telah mengalami proses pelapukan yang diakibatkan bereaksi dengan udara dan air, sampel tanah c*lay shale* dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1. (a) Tanah Clay Shale di Awal Penggalian Gunung Seriang, Kalimantan Utara (b) Lokasi Pengambilan Sampel Tanah *Clay Shale* (*source: google maps*)

Penambahan *fly ash* merupakan salah satu cara stabilisasi tanah *ekspansif* yang efektif, karena *fly ash* bersifat *pozzolan* sehingga dapat mengikat mineral tanah menjadi padat, sehingga mengurangi kembang susut tanah, menambahkan niai kekuatan tanah, mengurangi ekspansi reaksi *alkali silika*, meningkatkan ketahanan terhadap serangan sulfat, dan mengurangi penetrasi klorida karena ikatan *pozzolanic* (dan terkadang *hidraulik*) Selain itu, penggunaan *fly ash* juga mendukung praktik konstruksi yang ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah industry (Faray dan Rahayu, 2020) Menurut ASTM C168 (dalam Hagge, *et al* (2021) *fly ash* dibagi menjadi 2 kelas, yaitu kelas F dan kelas C, perbedaan dari 2 kelas tersebut adalah f*ly ash* kelas F memiliki sifat *pozzolanic* tetapi tidak memiliki sifat s*elf cementing*, sedangkan kelas C memiliki sifat p*oz-zolanic* dan s*elf cementing*. Berdasarkan tabel ASTM C 168, kapur diperlukan untuk f*ly ash* kelas F. Tujuan dari penambahan kapur adalah untuk meningkatkan sifat p*ozzolanic* dan *self cementing* dari *fly ash.* Komposisi kimia dan fisika dari *fly ash* menurut ASTM C168 dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1 *Chemical and Physical Composition of Fly Ash* (ASTM C 168)

Parameter		*Fly Ash*	
		Class F	Class C
A. Chemical composition of Fly Ash		%	%
Alumina Oxide (Al_2O_3), Silikon Dioxide (SiO_2), Iron Oxide(Fe_2O_3)	Min	70	50
Kalsium oxide(CaO)		<10	>20
Magnesium Oxide(MgO)	Max	5	5
SulfurTrioxide(SO_3)	Max	5	5
Flame loss		12	6
Alkali (Na_2O)	Max	1,5	1,5
Moisture content	Max	3	3

Parameter		*Fly Ash*	
		Class F	**Class C**
A. *Physical Properties*			
Expansion with autoclave	Max	0,8	0,8
Fineness 45 μm	Max	34	34

Sumber: ASTM C 168 in Hangge *et al* (2021)

Adapun kapur merupakan salah satu bahan stabilisasi tanah yang sering diaplikasikan pada konstruksi jalan untuk mengatasi berbagai macam masalah. Mulai dari jenis tanah lempung biasa hingga tanah lempung *ekspansif*. Kapur akan bereaksi langsung dengan air tanah untuk mengubah sifat-sifat tanah, mengurangi kelunakan dan daya lekat tanah (Hagge, *et al*., 2021).

Metode penelitian ini dilakukan dalam empat tahap, yaitu tahap persiapan, tahap penelitian lapangan, tahap penelitian di laboratorium, dan tahap analisis data. Tahap persiapan meliputi studi pendahuluan dan studi literatur. Tahap penelitian lapangan meliputi survei lokasi pengambilan sampel yang dilanjutkan dengan pengambilan sampel, dan penyediaan bahan dan alat yang akan digunakan. Tahap penelitian laboratorium meliputi pengambilan data dari uji parameter fisik tanah, uji pemadatan dengan alat pemadat standar dan uji CBR laboratorium, dokumentasi kegiatan, dan kegiatan lainnya. Tahap analisis data terdiri dari kegiatan pengolahan data hasil pengujian, simulasi hasil analisis, dan pembuatan laporan hasil penelitian.

Tahap Pengujian

1. Pengujian Indeks Properties tanah
   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat fisis dari tanah lempung. Pengujian ini meliputi:
   a. Uji kadar air (*water content*)) berpedoman pada standar SNI 1965-2019
   b. Uji Berat Jenis (*specific gravity*) SNI 1964-2008
   c. Uji Batas Cair, SNI 1967-2008
   d. Uji Batas Plastis, SNI 1966-2008, dan sebagainya
2. Pengujian pemadatan *(compaction)*
   Pemadatan yang dilakukan di laboratorium berpedoman pada standar SNI 1742-2008. Pengujian ini bertujuan untuk nilai kadar air optimum dan kepadatan maksimum kondisi initial
3. Variasi persentase dari bahan pencampuran benda uji yang terdiri dari tanah *clay shale*, kapur dan *fly ash* ditunjukkan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. **Variasi persentase bahan pencampuran benda uji**

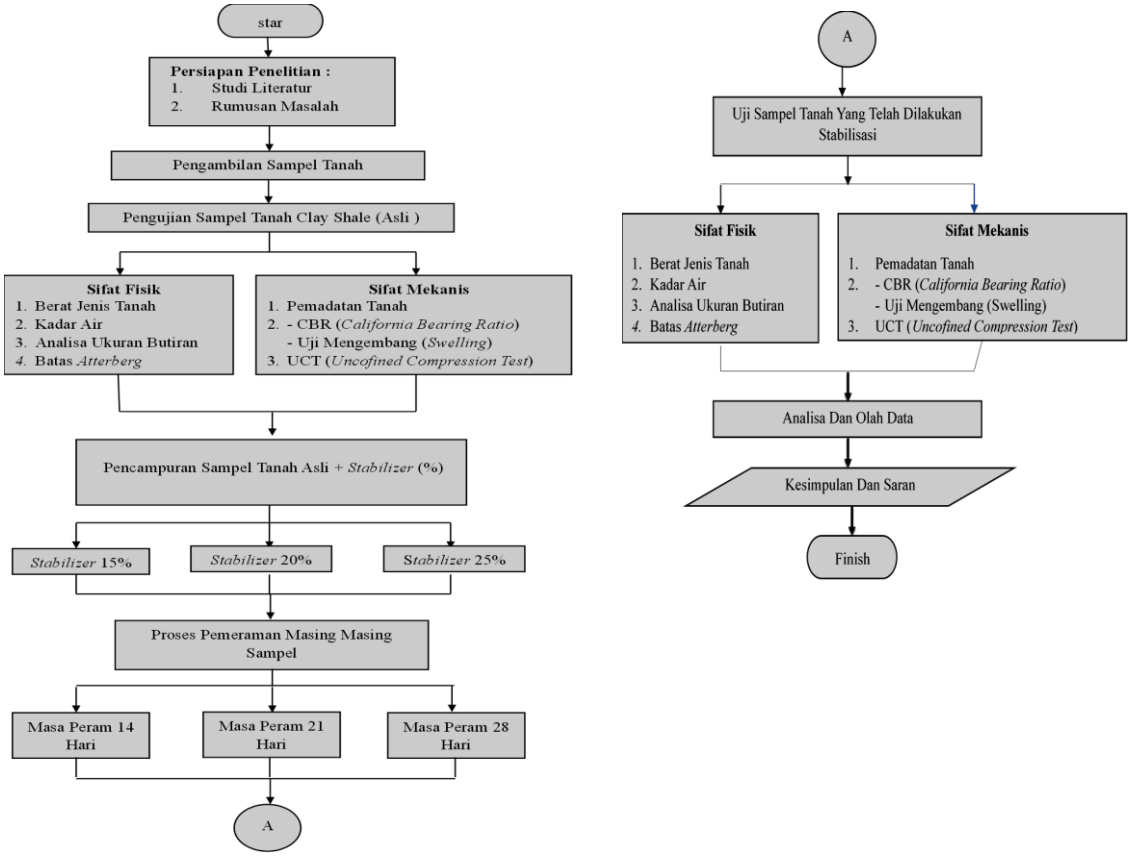
Variasi	Persentase campuran benda uji
Variasi 1	100% *Clay Shale* + 0% Kapur + 0% *fly ash*
Variasi 2	85% *Clay Shale* +10% Kapur +5% *fly ash*
Variasi 3	80% *Clay Shale* +15% Kapur + 5% *fly ash*
Variasi 4	75% *Clay Shale* + 20% Kapur + 5% *fly ash*

4. Pengujian CBR Laboratorium (*California Bearing Ratio*)
   Pengujian CBR dilakukan untuk mengetahui kekuatan tanah. Prosedur pengujian berpedoman pada standar SNI 1744-2012. Variasi campuran tanah yang digunakan sebagai sampel uji adalah variasi campuran seperti yang terlihat pada Tabel 1. Pengujian CBR laboratorium ini di lakukan

pada kondisi tidak terendam (*unsoaked*) dan kondisi terendam (*soaked*) dengan variasi lama perendaman selama 14 hari, 21 hari, dan 28 hari

5. Pengujian *Unconfined Compression Test* (UCT)
   Pengujian UCT atau uji tekan bebas ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat tekan sampel tanah. Prosedur pengujian berpedoman pada standar SNI 3638-2012. Variasi campuran tanah yang digunakan sebagai sampel uji , sama persisi dengan sampel uji tanah pada pengujian CBR. Pengujian UCT juga dilakukan pada kondisi terendam dengan tidak terendam

Secara garis besarnya , kegiatan penelitian ini dilakukan mengikuti diagram alir penelitian seperti yang di tunjukkan Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tanah Asli

1 Sifat Fisik Tanah Kondisi Asli (*Initial Condition*)

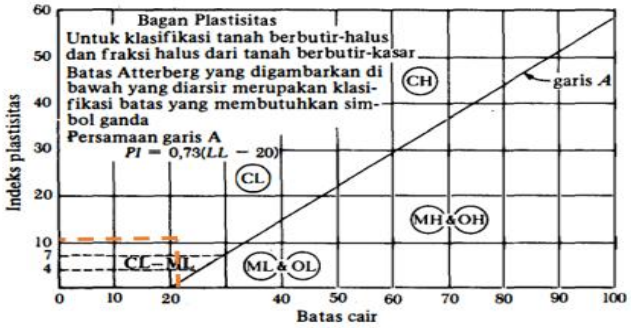
Hasil pengujian parameter sifat fisis tanah *clay shale* pada kondisi asli (*inisial condition*) ditunjukkan dalam Tabel 1 berikut

Tabel 3. Sifat fisik Tanah Kondisi Asli

No	Pengujian	Hasil	Satuan
1	Kadar air	2,27	%
2	Berat jenis	2,72	
3	*Grain size analysis*		
	a.Kerikil	0	%
	b.Pasir	86	%

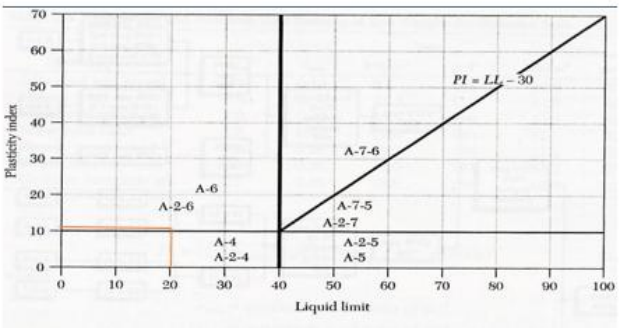
No	Pengujian	Hasil	Satuan
	c.Lempung/Lanau	14	%
4	*Atterberg Limit*		
	a.Batas cair (LL)	20,81	%
	b.Batas plastis (PL)	10,20	%
	c.Plastic Index (IP)	10,61	%

Dari hasil pengujian analisa saringan tanah *Clay Shale* seperti pada Tabel 3, berdasarkan sistem klasifikasi tanah USCS (*United Soil Classification System*) dinyatakan bahwa tanah asli *clay shale* termasuk dalam tanah berbutir kasar, karena tanah yang lolos saringan No 200 kurang dari 50%. Identifikasi selanjutnya, persentase tanah lolos saringan No 4 lebih dari 50% sehingga termasuk dalam fraksi pasir dan dari persentase tanah yang lolos saringan No 200 lebih 12% maka termasuk dalam klasifisikasi tanah SM atau SC. Untuk mengetahui lebih detail, dibutuhkan grafik batas-batas *Atterberg* untuk menunjukkan plastisitasnya seperti pada Gambar 3. Hasilnya menunjukkan bahwa tanah asli *Clay Shale* termasuk dalam SC (pasir berlempung, campuran pasir-lempung) dengan plastisitas rendah



Gambar 3. Sistem Klasifikasi Tanah menurut USCS

Sedangkan sistem klasifikasi tanah menurut AASHTO (*American Association Of State Highway And Transportation Officials*), yang didasari dari hasil pengujian saringan dan *Atterberg Limit* pada tanah asli, menunjukkan bahwa tanah tersebut termasuk dalam golongan A-2-6. Sampel tersebut memenuhi syarat klasifikasi A-2-6 dikarenakan sampel yang lolos saringan 200 max 35% dengan *liquid limid* (LL) max 40% dan Indeks Plastis (IP) min 11%, seperti yang terlihat pada Gambar 4 berikut ini



Gambar 4. Grafik Klasifikasi AASHTO Metode Batas Atterberg

Dari hasil pengujian berat jenis yang diperoleh, tanah *clay shale* tergolong lempung tak organik berdasarkan klasifikasi menurut Hardiyatmo (1992), dimana berat jenis 2,72 berada diantara *range* 2,68 - 2,75 seperti yang terdapat dalam Tabel 4 berikut

Tabel 4. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Berat Jenis

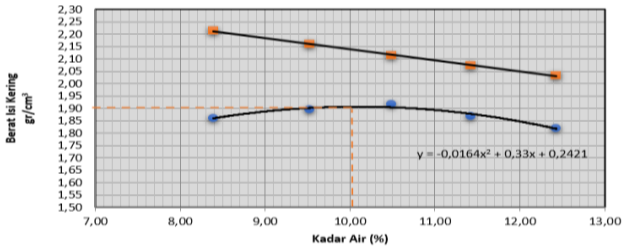
Jenis tanah	Berat jenis (G_S)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau tak organik	2,62 – 2,68
Lempung organik	2,58 – 2,65
Lempung tak organik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Sumber: Hardiyatmo (1992)

2. Sifat Mekanis Tanah Asli (*Initial Condition*)

a. Hasil Pengujian Pemadatan (*Compaction Test*)

Uji pemadatan (Proctor test) dilakukan untuk mengetahui berat isi kering (*Max Dry Density /MDD*) dan kadar air optimum (*Optimum Moisture Content /OMC*). Hasil perhitungan dari kadar air optimum dan berat isi kering akan digunakan sebagi patokan penambahan air pada sampel uji *CBR* dan *UCT*, Dari hasil pengujian pemadatan tanah asli *Clay shale* diperoleh kadar air optimum sebesar 10,06 % dengan berat isi kering 1,9 gr /cm^3



Gambar 5. Grafik Kadar Air Optimum Dan Berat Isi kering

b. Hasil Uji CBR (*California Bearing Ratio*) Tanah Asli *Clay shale*

- CBR Tanpa Rendaman

Pada pengujian *California Bearing Ratio* menggunakan 2 sampel dimana salah satu sampel dilakukan perendaman guna mengetahui kadar s*welling* (mengembang) sampel, Dimana hasil dari kedua sampel akan dilakukan perbandingan nilai *CBR*. Hasil dari percobaan tanah asli tanpa perendaman menunjukan nilai *CBR* tanah sebesar 22,71% dimana nilai CBR seiring waktu bisa saja terus terjadi penurunan dikarenakan sifat tanah *clay shale* mudah melapuk

Tabel 5. Data Analisis *CBR* tanah Asli

No	Pengujian	Hasil	Satuan
1	Tes Pemadatan		
	a.OMC	10,06	%
	b.Dry density	1,9	gr/cm^3
2	CBR Test		
	a.CBR Soaked		
	- CBR value	19,61	%
	- Water content	11,81	%

No	Pengujian	Hasil	Satuan
	- Dry density	1,91	gr/cm^3
	- Swelling	2,53	%
	b.CBR Unsoaked		
	- CBR value	22,71	%
	- Water content	8,06	%
	- Dry density	2,01	gr/cm^3
3	UCT	1,32	kg/cm^2

Perbandingan nilai *CBR* dengan penelitian yang Utomo dan Cahyono (2020), dimana tanah *Clay shale* yang diambil dari longsor ruas jalan tol Semarang-Solo sebesar 5,67%. Hal ini menujukan nilai CBR penulis lebih tinggi walupun sampel tanah yang digunakan telah melapuk, hal ini bisa terjadi karena faktor utama mineral penyusun tanah setiap wilayah yang berbeda dan jumlah kandungan air pada tanah juga berpengaruh terhadap daya dukung tanah.

- CBR Rendaman

Dari hasil percobaan *CBR* rendaman seperti yang terlihat pada Tabel 5**,** dimana pada saat perendaman tanah selama 4 hari diperolah data *swelling* tanah asli *Clay shale* sebesar 2,54 % sedangkan nilai *CBR* rendaman (*soaked*) mengalami penurunan dari *CBR* tanah asli tanpa perendaman (*unsoaked*) sebesar 3,1%. Dari hasil uji coba *CBR soaked* dan *unsoaked* diketahui jika terjadi peredaman akan berpengaruh terhadap penurunan nilai *CBR* dan hal tersebut terjadi karena terjadinya reaksi antara air dengan sampel tanah asli yang akan menyebapkan pelapukan, dimana dengan lepasnya ikatan antara lapisan tanah dan ruang pori yang terbentuk akan terisi air.

c. Hasil Uji *Uncofined Compression Test* Tanah Asli

Uji *Uncofined Compression Test* meghasilkan data kuat tekan bebas dan kohesi, hasil pengujian *Uncofined Compression Test* dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 6 Hasil pengujian UCT tanah asli

Hasil	Satuan	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Rata-Rata
Kuat tekan bebas (q_u)	Kg/cm^2	0,985	1,514	1,450	1,316

Berdasarkan Tabel 6 diatas menunjukan ketahanan sampel tanah terhadap tekanan yang diberikan sebelum terjadinya keruntuhan sampel yang diakibatkan meregang atau terpisahnya butiran tanah sampel. Pada sampel 1 hanya mampu menahan kuat tekan bebas q_u sebesar 0,98 kg/cm^2 sebelum terjadinya keruntuhan sampel. Sampel kedua dan ketiga memiliki kemampuan menahan kuat tekan bebas q_u sebesar 1,51 kg/cm^2 dan 1,45 kg/cm^2 sebelum terjadinya keruntuhan sampel.

B. Tanah *Clay shale* yang Distabilisasi dengan Bahan *Stabilizer*

1. Sifat Fisik Tanah *Clay shale* setelah di stabilisasi

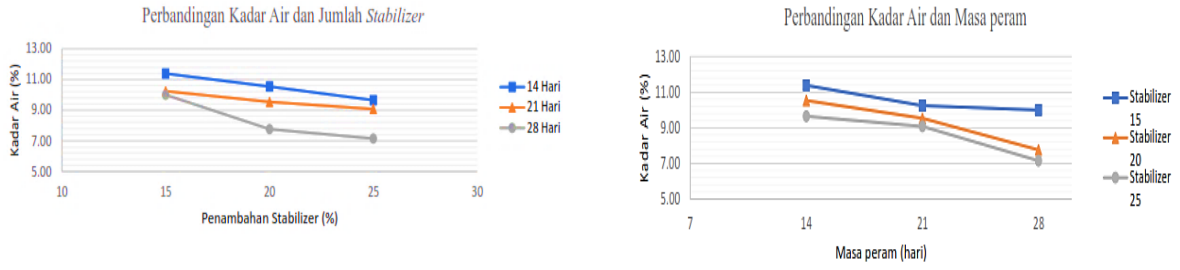
Stabilisasi tanah *clay shale* dengan kapur dan *fly ash* dilakukan untuk meningkatkan daya dukung tanah. Kapur dapat memberikan sifat sementit pada *fly ash*, sehingga tanah menjadi lebih kuat dan mengeras. Beberapa hal yang dapat diukur setelah dilakukan stabilisasi tanah *clay shale* dengan kapur dan fly ash antara lain hasil uji *specific gravity* (Gs), batas cair dan batas plastis. Hasil uji sifat fisis clay shale pada tanah asli dan tanah yang dicampur dengan bahan stabilisator (kapur dan *fly ash*) dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Hasil pengujian sifat fisis tanah *clay shale* yang telah di stabilisasi

Percentage	Physical Test	Physical Properties							
		Specific Gravity	Water Content	Grain Size Analysis			Atterberg Limits		
				gravel	sand	Silty/clay	Liquid Limit	Plastic Limit	Plastic Index
	Unit		%	%	%	%	%	%	%
0 %	Initial	2,719	22,7	0	85,97	14,02	20,809	10,196	10,613
15%	0 hari	2,729	14,84	-	-	-	24,36	11,01	13,35
	14 hari	2,743	11,38	0,03	98,55	11,45	28,03	13,03	15,00
	21 hari	2,767	10,24	2,82	89,72	10,28	29,10	15,04	14,06
	28 hari	2,878	10,00	3,21	91,38	8,62	30,30	16,90	13,40
20%	0 hari	2,759	14,05	-	-	-	24,56	12,50	12,06
	14 hari	2,774	10,53	0	98,52	9,48	29,18	14,72	14,46
	21 hari	2,895	9,53	1	93,39	6,61	30,08	16,13	13,95
	28 hari	3,076	7,76	3,88	93,88	6,12	31,19	17,80	13,39
25%	0 hari	2,787	13,29	-	-	-	24,90	13,03	11,87
	14 hari	2,796	9,65	0,14	95,10	8,90	30,50	16,44	18,25
	21 hari	2,903	9,07	2,20	91,60	8,40	31,49	18,25	13,24
	28 hari	3,183	7,15	3,82	91,58	8,12	32,21	19,35	12,85

Kadar Air (ω)

Berdasarkan hasil data dari Tabel 7 tentang perubahan kadar air tanah *clay shale* yang telah distabilisasi, menunjukkan perubahan kadar air yang semakin berkurang akibat masa perendaman dan penambahan bahan *stabilizer*. Semakin lama masa perendaman pada sampel, maka kadar air tanah semakin berkurang. Hal yang sama juga berlaku pada penambahan jumlah *stabilizer* pada sampel, semakin besar persentase penambahan stabilizer maka kadar air pada campuran tanah juga akan berkurang



(a) **(b)**

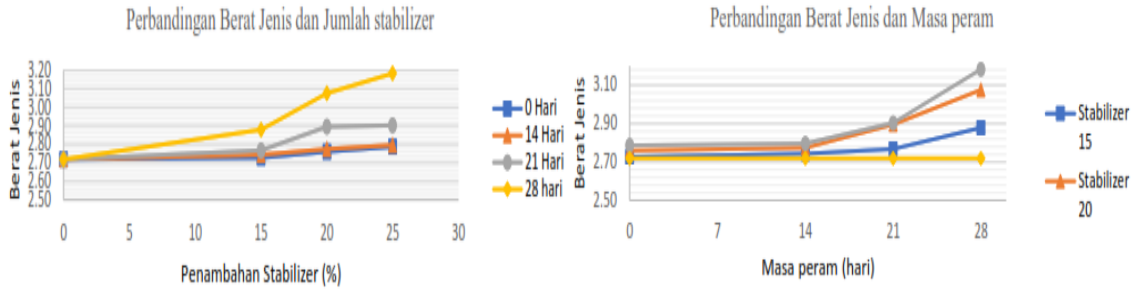
Gambar 6. (a) Pengaruh penambahan stabilizer terhadap perubahan kadar air tanah b) Pengaruh masa peram terhadap kadar tanah

Selama proses perendaman, sampel yang telah di tambahkan dengan *stabilizer* membutuhkan air untuk terjadinya reaksi *pozzolan* yang akan mengikat partikel-partikel butiran tanah. Faktor inilah yang menyebabkan penurunan kadar air pada sampel dari waktu ke waktu. Dari Gambar 6 terlihat bahwa jika jumlah *stabilize*r yang ditambahkan semakin banyak, maka kadar air akan semakin berkurang.

Berat Jenis (*Specific Gravity*)

Perubahan berat jenis pada sampel yang telah mengalami stabilisasi ditunjukkan pada Gambar 7, dimana terlihat terjadi peningkatan berat jenis tanah setelah ditambahkan *stabilizer*. Penambahan stabillizer ini menyebabkan tanah akan mengalami proses *pozzolanic*, dimana setelah terjadinya reaksi

akan terbentuk kristal gel yang akan mengisi pori pori tanah sebagai pengikat sehingga tanah tersebut akan lebih kaku dan tidak mudah menyusut ataupun mengembang, sehingga terjadi peningkatan berat pada volume butiran tanah



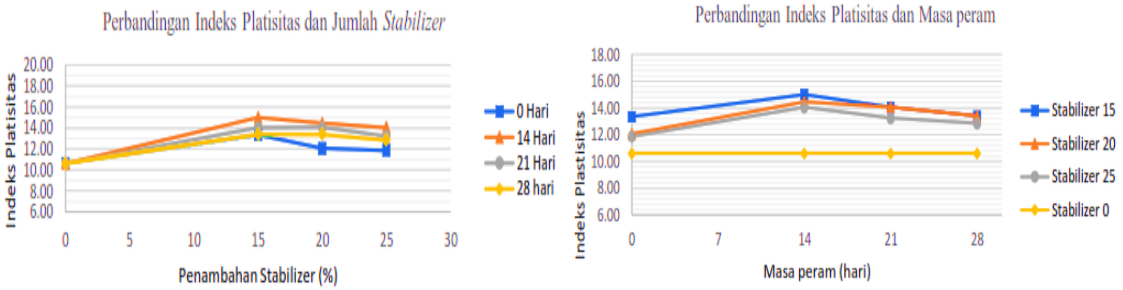
Gambar 7. (a) Pengaruh penambahan stabilizer terhadap perubahan berat jenis tanah (b) Pengaruh masa peram terhadap berat jenis tanah

Batas-Batas Atterberg

Hasil pengujian batas batas Atterberg seperti batas cair, batas plastis dan indeks plastisitas pada tanah *clay shale* yang telah di stabilisasi juga mengalami perubahan seperti yang terlihat pada Tabel 7, dimana batas cair (*liquid limit*) dan batas plastis *(plastic limit*) mengalami peningkatan yang cukup signifikan pada hari ke 28 perendaman dengan jumlah *Stabilizer* sebanyak 25%.

Peningkatan batas cair dan batas plastis pada sampel tanah di sebabkan terjadinya reaksi *pozzolanic*, dimana pada reaksi *pozzolan* diperlukan air, sedangkan sampel tanah asli yang digunakan memiliki kadar air yang rendah, sehingga ketika air ditambahkan, maka f*ly ssh* dan kapur yang memiliki sifat *pozzolan* akan mengikat air tersebut guna terjadinya reaksi yang akan membentuk kristal gel yang akan mengikat butiran-butiran tanah sehingga tanah menjadi kaku

Adapun nilai indeks platisitas (p*lastic index*), pada awalnya terjadi peningkatan cukup signifikan pada penambahan *stabilizer* 15% dengan masa peram 14 hari, namun mengalami penurunan setelah persentase *stabilizer* di tambahkan, hal tersebut terlihat pada Gambar 8 berikut



Gambar 8. (a) Pengaruh penambahan stabilizer terhadap perubahan nilai indeks plastisitas (b) Pengaruh masa peram terhadap perubahan nlai indeks plastisit tanah

Menurunnya indeks plastisitas tanah menunjukan bahwa sampel tanah mengalami peningkatan kualitas tanah, disebabkan semakin rendah atau menurunnya indeks plastisitas maka tanah tersebut tidak mudah menyerap air sehingga terjadinya perubahan volume (*swelling*) pada tanah.sangat kecil

Dari hasil uji gradasi tanah juga terlihat peningkatan butiran tanah akibat kadar air dan indeks plastisitas menurun. Butiran tanah menjadi menggumpal membentuk kristal gel, sehingga tanah mengeras. Setelah di uji saringan frase lempung (*clay*) persentasenya menurun, sebaliknya friksi pasir (*sand)* dan kerikil (*grave*l) mengalami peningkatan.

Reaksi pozzolan akan berperan penting dalam proses stabilisasi yang akan dilakukan dengan penambahan fly ash dan kapur pada tanah clay shale. P. Sergant (dalam Hangge et.al, 2022) dalam bukunya yang berjudul "*Cement, Mortar and Alkali-Activated Concrete Handbook*" mengatakan bahwa reaksi *pozzolan* membutuhkan waktu lama untuk beraksi dimana mekanisme utama tersebut melibatkan *kalsium hidrosida* (kapur padam / $Ca(OH)_2$) melalui air kedalam tanah yang akan bergabung dengan *aluminium oksida* (Al_2O_3) atau nama mineral *alumina* dan *silikon dioksida* (SiO_2) atau nama lain *silika.*(P, Sergant, 2015). Mineral *alumina /aluminium oksida* (Al_2O_3) dan *silika / silikon dioksida* (SiO_2) yang beraksi dengan adanya air dan alkali tanah (dalam tabel periodik) misalnya *kalsium oksida* (CaO) terkandung dalam *Fly Ash* akan menghasilkan bahan semen yang terdiri dari *kalsium silikat* (Ca_2SiO_4) dan *hidrat aluminat*
Ion $Ca2^+$ yang terkandung pada tanah beraksi dengan (Al_2O_3) dan (SiO_2) akan menghasilkan gel yang terhidrasi CSH dan CAH sehingga akan menyatukan partikel tanah yang dapat dilihat pada Gambar 9, dimana ikatan yang terjadi dapat dilihat pada persamaan berikut :

$+ \ CaO + H_2O \ \rightarrow Ca(OH)_2$ (reaksi 1)
Kalsium oksida (Kapur tohor) + air → kalsium hidroksida (kapur padam)

$+ SiO_2 + H_2O \ \rightarrow \ H_2SiO_3 \ atau \ SiO(OH)_2$ (reaksi 2)
Silikon dioksida + air → asam metasilikat

$+ SiO_2 + 2H_2O \ \rightarrow \ H_4SiO_4 \ atau \ SiO(OH)_4$ (reaksi 3)
Silikon dioksida + 2 molekul air → asam ortosilikat

- Reaksi 1 + reaksi 2

$Ca(OH)_2 + \ H_2SiO_3 \rightarrow CaSiO_3 + 2H_20$
kalsium hidroksida + asam metasilikat → kalsium silicate + 2 molekul air

- Reaksi 1 + silikon dioksida

$Ca(OH)_2 + \ SiO_2 \rightarrow CaSiO_3 + H_20$
kalsium hidroksida + silikon dioksida → kalsium silicate + air

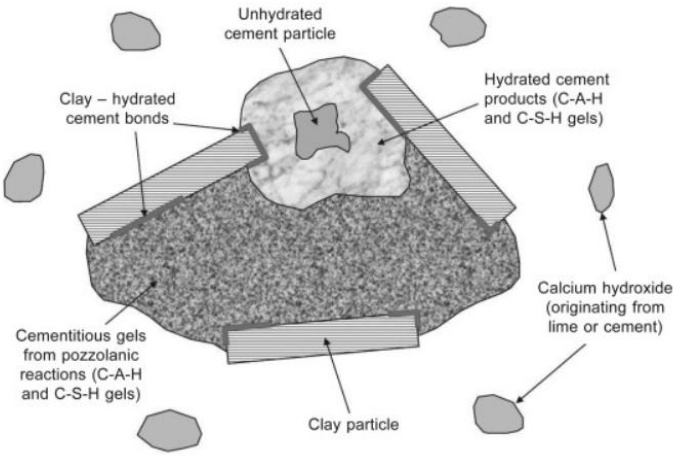
- Reaksi 1 + reaksi 2

$Ca(OH)_2 + \ H_4SiO_4 \rightarrow CaH_2SiO_4 + 2H_20$

Hasil rangkuman dalam notasi kimia diatas dapat disingkat Sebagai CSH atau dengan nama mineral Phase CSH (Calcium Silicate Hydrate).

$CaO + \ Al_20_3 \rightarrow CaAl_20_4$
kalsium Oksida + aluminium oksida → *monocalcium aluminate*

Hasil notasi kimia diatas dapat disingkat Sebagai CAH atau dengan nama mineral Phase CAH (*Calcium Aluminate Hydrate*).



Gambar 9. Ikatan Partikel Selama Hidrasi dan Reaksi *Pozzolan*
Sumber: P. Sergant (2015)

Saat reaksi *pozzolan* ini berlangsung akan menghabiskan sebagian kandungan air pada partikel tanah yang akan berakibat material menjadi lebih kaku dan sampel tanah tidak mudah menyusut atau mengembang volumenya. Hasil campur pada reaksi *Pozzolan* menurut P.Sergant (2015) akan tetap berlangsung hingga 5 tahun setelah pencampuran tersebut. *Aluminat* dan *silikat* yang beraksi dengan kapur pada pembentukan ikatan sangat bergantung dengan PH tanah

2. Sifat Mekanis Tanah Clay shale setelah di stabilisasi

Hasil uji sifat fisis clay shale pada tanah asli dan tanah yang dicampur dengan bahan stabilisator (kapur dan fly ash) dapat dilihat pada Tabel 8 berikut

Tabel 8 Hasil pengujian sifat mekanis tanah *clay shale* yang telah di stabilisasi

Persentage	Mechanical Test	Mechanical Properties					
		Proctor Standart		California Bearing Ratio			Uncofined Compression Test
		Optimum Moisture Conten	Dry Density	CBR soaked		CBRunsoaked	Uncomfined Compressive Strength
				CBR value	Swelling	CBR value	
	Unit	%	gr/cm^3	%	%	%	kg/cm^2
0 %	Initial	10,06	1,90	19,61	2,53	22,71	1,32
15%	0 hari	14,84	1,673	-	-	-	-
	14 hari	-	-	93,17	0,08	115,61	26,68
	21 hari	-	-	95,23	0,06	126,96	37,52
	28 hari	-	-	101,35	0,05	133,67	39,57
20%	0 hari	14,05	1,624	-	-	-	-
	14 hari	-	-	102,24	0,05	105,80	23,51
	21 hari	-	-	103,78	0,03	110,96	37,50
	28 hari	-	-	107,54	0,02	121,28	38,05
25%	0 d hari	13,29	1,580	-	-	-	-
	14 hari	-	-	110,45	0,01	92,90	20,94
	21 hari	-	-	111.48	0,05	92.90	27,32
	28 hari	-	-	118,70	0,02	118,70	28,78

▪ Hasil pengujian pemadatan

Penambahan *stabilizer* pada uji pemadatan tanah menyebabkan terjadinya perubahan pada kadar air optimum (OMC). Dari hasil uji pemadatan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8, pada awalnya setelah tanah clay shale di tambahkan bahan *stabilizer*, kondisi kadar air optimum dan kepadatannya meningkat dari kondisi inisial. Setelah diperam dan persentase bahan stabilizernya di tambahkan, kondisi kadar air optimum dan kepadatannya menurun.

Tabel 9 Hasil uji pemadatan pada tanah *clay shale* yang telah di stabilisasi

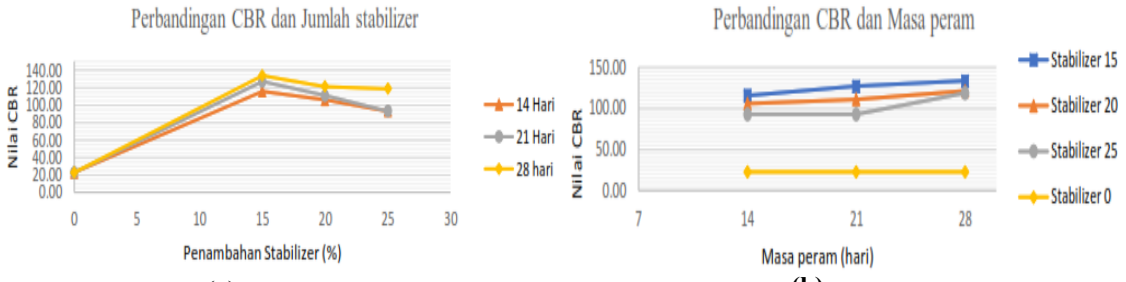
Variasi	Uji pemadatan	Hasil	Satuan
0%	Optimum Moisture Content (OMC)	10,06	%
	Max Dry Density (MDD)	1,90	gr/cm^3
15%	Optimum Moisture Content (OMC)	14,84	%
	Max Dry Density (MDD)	1,67	gr/cm^3
20%	Optimum Moisture Content (OMC)	14,05	%
	Max Dry Density (MDD)	1,62	gr/cm^3
25%	Optimum Moisture Content (OMC)	13,29	%
	Max Dry Density (MDD)	1,58	gr/cm^3

Pada dasarnya *stabilizer* dapat meningkatkan atau mengurangi kadar air optimum, dalam hal ini adanya kapur dan *fly ash* yang bersifat *pozzolonic* seperti halnya semen, yang dapat mengurangi kadar air optimum. Bahan tersebut dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah, sehingga membutuhkan lebih sedikit air untuk mencapai kepadatan yang sama. Demikian halnya dengan tingkat kepadatan tanah, dimana kepadatan tanah menurun setelah penambahan *stabilizer* pada uji pemadatan disebabkan karena adanya interaksi antara *stabilizer*, air, dan partikel tanah. *Stabilizer* dapat mengubah sifat tanah, misalnya dengan meningkatkan kohesi atau membentuk agregat, yang bisa mengurangi ruang pori yang dapat diisi oleh partikel tanah. Akibatnya, meskipun upaya pemadatan dilakukan, jumlah partikel yang dapat dipadatkan berkurang, sehingga menyebabkan penurunan kepadatan.

▪ Hasil pengujian CBR

Pengujian CBR (*California Bearing Ratio*) dilakukan dengan dua cara, yaitu CBR rendaman (*soaked*) dan CBR tanpa rendaman (*unsoaked*). CBR rendaman dilakukan setelah benda uji direndam dalam air, selama 4 hari, untuk mensimulasikan kondisi tanah yang jenuh air. Sedangkan CBR tanpa rendaman dilakukan tanpa perendaman, langsung setelah benda uji dipadatkan

Dari hasil uji CBR pada Tabel 8, menunjukkan bahwa pemeraman *(curing*) pada tanah berpengaruh signifikan terhadap nilai CBR. Pemeraman umumnya meningkatkan nilai CBR karena proses ini membantu tanah menjadi lebih padat dan merata, sehingga meningkatkan kekuatan dan kekakuan.. Pemeraman dapat mengurangi kadar air dan menurunkan batas cair tanah, yang berakibat pada penurunan indeks plastisitas, sehingga meningkatkan nilai CBR.



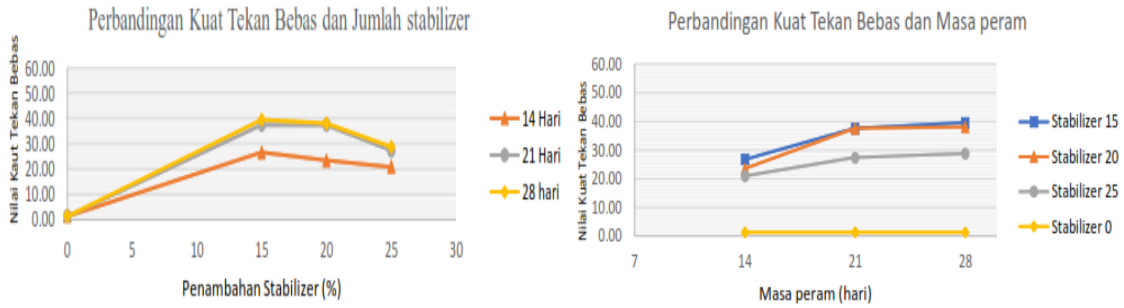
(a) **(b)**

Gambar 10. (a) Pengaruh penambahan stabilizer terhadap nilai CBR
(b) Pengaruh masa peram terhadap nilai CBR

Stabilizer bekerja dengan cara meningkatkan ikatan antar partikel tanah, sehingga tanah menjadi lebih kuat dan lebih tahan terhadap beban. Penambahan fly ash meningkatkan nilai CBR karena adanya reaksi *pozzolan* yang membentuk senyawa kimia yang mengeras dan menguatkan tanah. Kapur juga efektif meningkatkan nilai CBR, terutama pada tanah yang memiliki sifat kembang susut tinggi. Ini dapat terlihat dari menurunnya nilai *swelling* tanah akibat adanya penambahan *stabilizer* Pada Gambar 10 terlihat bahwa nilai CBR paling besar terjadi pada penambahan *stabilizer* sebesar 15%, selanjutnya dengan penambahan *stabilizer* 20% sampai 25% justru nilai CBR terjadi penurunan. Hal tersebut terjadi karena pada *stabilizer* 15%, air yang ditambahkan lebih banyak, berhubung pada uji pemadatan, kadar air optimum paling tinggi terjadi pada sampel ini. Faktor penambahan air juga berpengaruh terhadap peningkatan CBR dikarenakan pada proses *pozzolan* yang terjadi membutuhkan air dalam proses reaksinya dalam mengikat butiran-butiran tanah. Dengan penambahan *stabilizer* yang terlalu banyak justru mengurangi nilai CBR tanah (Yulianti et all. 2023).

- Hasil pengujian UCT

Pengujian *Unconfined Compression Test* (UCT) menunjukkan peningkatan nilai UCT setelah penambahan *stabilizer* dan masa pemeraman. Masa pemeraman, atau waktu yang dibutuhkan untuk memperkuat campuran tanah setelah pengadukan, memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai UCT .Semakin lama masa pemeraman, semakin tinggi nilai UCT, yang menunjukkan peningkatan kekuatan tanah. seperti yang terlihat pada Gambar 11. Ini berarti bahwa masa pemeraman memberikan efek positif pada kekuatan tekan tanah.



Gambar 11 (a) Pengaruh penambahan stabilizer terhadap nilai kuat tekan bebas
(b) Pengaruh masa peram terhadap nilai kuat tekan bebas

Peningkatan paling maksimum pada kuat tekan bebas terjadi pada penambahan jumlah *stabilizer* 15 % dan akan mengalami penurunan pada penambahan *stabilizer* lebih dari 15%, seperti yang terlihat pada Gambar 12 Penurunan nilai UCT ini terjadi karena peningkatan batas plastis dan penurunan indeks plastisitas (PI) sehingga tanah menjadi lebih keras dan lebih sulit untuk dikompresi. meskipun kekuatannya sebenarnya meningkat

Kesimpulan

Dari hasil pengujian sifat fisis tanah *clay shale* yang di tambahkan kapur dan *fly ash* sebagai *bahan stabilizer* dengan memvariasikan persentase penambahan dan masa pemeraman menunjukkan terjadinya penurunan kadar air tanah *clay shale*. Penurunan tertinggi terjadi pada penambahan *stabilizer* 25% dan masa peram 28 hari, dimana kadar air tanah *clay shale* kondisi initial sebesar 22,7% menjadi 7,15%, sedangkan berat jenis tanah mengalami peningkatan dari 2,719 menjadi 3,183. Adapun batas cair dan batas plastis tanah mengalami peningkatan dan indeks plastisitas mengalami penurunan. Pada hasil uji saringan, kandungan lempung pada tanah *clay shale* yang pada kondisi awal mengandung 14,02% lempung, setelah di tambahkan *stabilizer* menjadi 6,12%. Penambahan kapur dan *fly ash* pada tanah *clay shale* memicu reaksi *pozzolanic.* Kapur menyediakan kalsium yang diperlukan untuk reaksi *pozzolanic*. Fly ash, sebagai bahan *pozzolanic*, mengandung silika dan alumina reaktif yang bereaksi dengan kapur. Sedangkan lempung mengandung silikat dan aluminat

yang dapat bereaksi dengan kapur dan *fly ash*. Reaksi ini menghasilkan senyawa yang mengikat partikel tanah bersama-sama, meningkatkan kekuatan dan stabilitas tanah

Penguian sifat mekanis tanah *clay shale* berupa uji pemadatan dengan Proctor Standar, uji CBR dan uji UCT. Dari hasil uji pemadatan, pada awalnya setelah tanah *clay shale* di tambahkan bahan *stabilizer* lalu diperam, kondisi kadar air optimum dan kepadatannya meningkat dari kondisi inisial. Setelah diperam dan persentase bahan stabilizernya di tingkatkan, kondisi kadar air optimum dan kepadatannya justru menurun. Hal yang sama juga terjadi pada pengujian CBR dan UCT dimana hasil uji CBR dan UCT menunjukkan bahwa pemeraman *(curing*) pada tanah berpengaruh signifikan terhadap nilai CBR dan UCT. Pemeraman umumnya meningkatkan nilai CBR dan UCT karena proses ini membantu tanah menjadi lebih padat dan merata, sehingga meningkatkan kekuatan dan kekakuan. Pemeraman dapat mengurangi kadar air dan menurunkan batas cair tanah, yang berakibat pada penurunan indeks plastisitas sehingga nilai CBR dan UCT meningkat. Pada penambahan *stabilizer,* berdasarkan data yang diperoleh peningkatan paling maksimum terjadi pada penambahan jumlah *stabilizer* 15 % dan akan mengalami penurunan pada penambahan *stabilizer* lebih dari 15%

Ucapan Terima kasih

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesarnya kepada pimpinan dan seluruh civitas akademik Universitas Borneo Tarakan atas fasilitas pembiayaan berupa bantuan dana pengelolaan riset yang disediakan oleh UBT yang dikelola oleh LPPM UBT sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik

Daftar Pustaka

Adisurya, H., & Makarim, C. A. 2022. Perilaku Kegagalan Konstruksi Jalan Raya Yang Bertumpu Pada Fondasi Tiang Di Tanah Clay Shale. *Jmts: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, *5*(1), hal. 55–70, from https://Doi.Org/10.24912/Jmts.V5i1.16516

Alatas, Idrus M, Samira A.K, Ramli N, Irsyam M. 2016. Effect of Weathering on Disintegration and Shear Strength Reduction of Clay Shale. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering),* 78(7-3), hal. 93-99

Ariesnawan, R. A. 2015. Karakteristik Mekanik Dan Dinamik Clay Shale Kabupaten Tuban Terhadap Perubahan Kadar Air*, Thesis Rc-2399*, Indonesia: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, from https://Repository.Its.Ac.Id/41609/1/3112201002-Master Thesis.Pdf

Dwi Wahyuni, N., Putra, A. D., & Syah, A. 2021. Kinerja Fly Ash Terhadap Stabilisasi Tanah Lunak Sebagai Material Perbaikan Tanah Dasar (*Subgrade*). Kinerja Fly Ash Terhadap Stabilisasi Tanah Lunak Sebagai Material Perbaikan Tanah Dasa*r*, *9*(3), hal. 547–558.

Faray, & Rahayu, W. (2020). Durability and strength improvement of clay shale using various stabilized materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *426*(1), 012028. doi:10.1088/1755-1315/426/1/012028

Hangge, E. E., Bella, R. A., & Ullu, M. C. 2021. Pemanfaatan Fly Ash Untuk Stabilisasi Tanah Dasar Lempung Ekspansif. Jurnal Teknik Sipil, 10(1), hal. 89–102.

Hangge, E. E., Galla, H. D., & Cornelis, R. 2022. Perilaku Tegangan Regangan Lempung Ekspansif yang Distabilisasi Menggunakan Kapur, Fly Ash dan Bottom Ash. Jurnal Forum Teknik Sipil (J-ForTekS), 2(2), hal.1-10.

Hardiyatmo, H. 1992. Mekanika Tanah 1. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.

Idrus, M., Alatas. 2020. Perilaku Tanah Clay Shale Yang Telah Lapuk Distabilitasi Dengan Semen Studi Kasus Clay Shale Cariu Jonggol. Jakarta: Institut Sains dan Teknologi Nasional.

Sergent, P. 2015. The Development of Alkali-Activated Mixtures for Soil Stabilisation. In*:* Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*,* Elsevier, hal. 555-604.

Sadisun, I. A., Subandrio, A. S., Nurjamil, A., & Prihananto, S. 2006.”Weathering Of Some Selected Rock Types And Their Strength Degradation Obtained From Schmidt Hammer”. Proceeding

Pit Iagi Riau, The 35th Iagi Annual Convention And Exhibition, (Pekanbaru–Riau, November 2006), hal. 21–22.

Sains, I., Istn, N., Kahfi, J. M., & Jagakarsa, I. I. (2017). Pengaruh Proses Pelapukan Clay Shale Terhadap Perubahan Parameter Rasio Disintegritas (Dr). *Jurnal Teknik Sipil Itb*, *24*(1), hal. 77–82. From https://Doi.Org/10.5614/Jts.2017.24.1.9

SNI 1964-2008. 2008. Cara uji berat jenis tanah, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia

SNI 1965-2008. 2008, Cara uji penentuan kadar air untuk tanah dan batuan di laboratorium, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia

SNI 1966-2008. 2008. Cara Uji Penentuan Batas Plastis dan Indeks Plastisitas Tanah. Jakarta, Indonesia

SNI 1742-2008. 2008. Cara Uji Kepadatan Ringan Untuk Tanah, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia

SNI 1744-2012. 2012. Metode Uji CBR Laboratorium, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia

SNI 3638-2012. 2012, Metode Uji Kuat Tekan Bebas Tanah Kohesif,, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, Indonesia

Susanto, A. 2021. Pengaruh Stabilisasi Tanah *Clay Shale* dengan Semen terhadap Nilai CBR. Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan, 15(2), 121-128.

Utomo, B., & Cahyono, E. (2020). Analisis Sifat-Sifat Geoteknik Tanah *Clay Shale* yang Mengalami Pelapukan. *Jurnal Ilmu Teknik Sipil*, *11*(1), 55-64.

Wibowo, T. (2021). Pengaruh Semen PC Type-2 Terhadap Ketahanan Tanah *Clay Shale* yang Telah Mengalami Pelapukan. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, *5*(1), hal. 22-30.

Yulianti, D., Firda, A., Djohan, B., & Syahrul Fuad, I. (2023). Stabilitas Tanah Lempung Menggunakan Kapur dan *Fly Ash* dengan Pengujian CBR. Jurnal Teknik Sipil LATERAL, *1*(2), hal. 47–53. doi:10.52333/lateral.v1i2.411.