

Pengaruh Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif menggunakan Kapur, Fly Ash dan Bottom Ash Terhadap Kapasitas Dukung Tanah

Effect of Expansive Clay Stabilization Using Lime, Fly Ash and Bottom Ash to the Bearing Capacity of the Soil

Elsy E. Hangge¹, Rosmiyati A. Bella¹, Anastasia Q. S. Manek^{2*}

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

² Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang 65145, Indonesia

Article info:

Kata kunci:

Stabilisasi, Lempung Ekspansif, *Fly Ash*, *Bottom Ash*, *California Bearing Ratio* (CBR)

Keywords:

Stabilization, Expansive Clay, *Fly Ash*, *Bottom Ash*, *California Bearing Ratio* (CBR)

Article history:

Received: 25-07-2022

Accepted: 10-09-2022

*Koresponden email:
stadia2016@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini dilakukan sebagai upaya perbaikan melalui stabilisasi secara kimiawi, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat fisik dan mekanis tanah, serta kapasitas dukung maksimum yang dihasilkan berdasarkan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) terendam dan tak terendam, yakni tanpa pemeraman dan dengan tujuh hari pemeraman. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental. Tanah asli (TA) dicampurkan dengan 5% kapur, 20% *bottom ash* dan variasi *fly ash* 10% (V1), 15% (V2), 20% (V3), 25% (V4) dan 30% (V5). Hasil pengujian menunjukkan tanah asli tergolong dalam kelompok A-7-6 berdasarkan sistem AASHTO dan kelompok CH berdasarkan sistem USCS. Seiring penambahan stabilisator nilai berat jenis, batas cair, batas plastis, indeks plastisitas, persentase tanah berbutir halus, kadar air optimum dan potensi pengembangan mengalami penurunan, sedangkan nilai batas susut, berat volume kering dan nilai CBR mengalami peningkatan. Kelima variasi campuran yang ada memenuhi syarat nilai CBR untuk kondisi terendam (>3%), dan hanya V1 yang tidak memenuhi syarat nilai CBR untuk kondisi tak terendam (>6%). Kapasitas dukung maksimum dihasilkan dari sampel CBR tak terendam dengan tujuh hari pemeraman (V5) sebesar 16,66%.

Abstract

This research was carried out as an effort to improve through chemical stabilization, to determine effect on the physical and mechanical properties of the soil, as well as the maximum bearing capacity produced through the soaked and unsoaked *California Bearing Ratio* (CBR) values, namely without equalization and with seven days of equalization. The research method used is the experimental method. The original soil (TA) was mixed with 5% lime, 20% bottom ash and fly ash variations of 10% (V1), 15% (V2), 20% (V3), 25% (V4) and 30% (V5). The test results showed the original soil is included in the A-7-6 group according to the AASHTO system and CH group according to the USCS system. Along with the addition of stabilizers, the specific gravity value, liquid limit, plasticity limit, plasticity index, fine-grained soil percentage, optimum moisture content and development potential decreased, while the shrinkage limit value, dry volume weight and CBR value increased. The five existing variations of the mixture qualify the soaked CBR value condition (>3%), and only V1 does not meet the unsoaked CBR value condition (>6%). The maximum bearing capacity resulted from an unsoaked CBR sample with seven days of equalization (V5) of 16.66%.

1. Pendahuluan

Tanah merupakan dasar dari konstruksi bangunan sipil yang berfungsi menerima dan menahan beban dari struktur di atasnya. Untuk itu tanah harus mempunyai daya dukung yang kuat agar mampu menahan beban yang dimaksud. Namun pada kenyataan di lapangan banyak ditemukan tanah dengan plastisitas yang tinggi, kekuatan geser yang rendah, perubahan volume yang besar dan potensi kembang susut yang besar pula. Sifat-sifat tersebut sering menimbulkan kerusakan konstruksi seperti retaknya dinding, terangkatnya pondasi, badan jalan yang bergelombang dan sebagainya. Ullu, Hangge and Bella (2020) serta Dom, Hangge and Cornelis (2021) telah melakukan penelitian terhadap tanah di Desa Oebelo, dan teridentifikasi sebagai tanah berjenis lempung ekspansif yang mempunyai potensi kembang susut besar. Oleh karena itu tanah tersebut perlu distabilisasi sebelum digunakan sebagai tanah dasar. Kedua peneliti tersebut melakukan stabilisasi menggunakan kapur dan *fly ash*. Hasil pengujiannya menunjukkan bahwa penambahan 5% kapur dan *fly ash* bervariasi antara 10-50% mampu meningkatkan kapasitas dukung tanah. Namun pada penambahan *fly ash* hingga 50% dari berat kering tanah, nilai kapasitas dukung terus menunjukkan peningkatan dan belum menyentuh nilai optimum. Selain itu adapula sisa pembakaran batu bara berupa abu dasar, atau yang dikenal dengan *bottom ash*. Bahan ini berukuran lebih besar dan lebih berat dari *fly ash*, namun memiliki kandungan kimia yang hampir sama, sehingga dapat digunakan pula sebagai bahan stabilisasi (*Boiler Slag Material Description* 2000). Berlandaskan hal-hal tersebut, maka peneliti tertarik untuk melakukan penelitian lanjutan, melalui stabilisasi menggunakan 5% kapur, 20% *bottom ash* serta variasi *fly ash* sebesar 10%, 15%, 20%, 25% dan 30% dari berat kering tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh stabilisasi terhadap sifat fisik dan mekanis tanah, serta kapasitas dukung maksimum yang dihasilkan melalui nilai *California Bearing Ratio* (CBR).

2. Bahan dan Metode

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah sampel tanah lempung ekspansif yang diambil dari Jl. Timor Raya Km.21, Desa Oebelo, Kecamatan Kupang Tengah, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Selain itu, bahan stabilisasi yang digunakan adalah kapur padam yang dibeli di Kota Kupang, serta *fly ash* dan *bottom ash* yang diambil dari PLTU Bolok Kupang. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental, yakni melalui pengujian di Laboratorium pada bulan Juni 2021 - Februari 2022.

2.1. Teknik Pengambilan Data

1. Teknik Dokumentasi

Teknik dokumentasi dilakukan dengan mengambil dan mengumpulkan foto atau gambar, serta data-data pendukung lainnya seperti referensi dari buku dan jurnal yang berisikan tentang dasar teori serta rumus-rumus yang digunakan dalam penelitian ini.

2. Teknik Observasi

Teknik observasi yaitu melalui pengamatan dan pencatatan secara sistematis mengenai gejala yang tampak pada obyek penelitian. Teknik observasi dalam penelitian ini adalah pengujian di Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil Universitas Nusa Cendana dan Laboratorium Pengujian dan Bina Teknik Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Nusa Tenggara Timur.

2.2. Tahapan Penelitian

1. Pengambilan Sampel dan Persiapan Benda Uji

Sampel tanah diambil dari Desa Oebelo pada letak koordinat 10°06'38" LS dan 123°44'50" BT, dengan kedalaman ±50 cm dari permukaan atas tanah. Sampel tanah ini diambil pada musim kering di bulan Juni 2021. Sampel tanah terganggu yang telah diambil kemudian dikeringkan dengan dijemur di bawah terik matahari langsung selama tiga sampai empat hari. Setelah kering tanah dihancurkan dan diayak menggunakan saringan No.4, No.10, dan No.40.

2. Pengujian Tanah Asli

Pengujian terhadap tanah asli dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat fisik dan mekanis tanah. Dalam penelitian ini dilakukan beberapa jenis pengujian berdasarkan prosedur pada ASTM Standar. Pengujian yang dimaksudkan antara lain :

A. Pengujian kadar air (ASTM D 2216-98)

- B. Pengujian berat jenis spesifik (ASTM D 854-02)
- C. Pengujian batas-batas *Atterberg*
 - Batas cair (ASTM D 4318-00)
 - Batas plastis (ASTM D 4318-00)
 - Batas susut (ASTM D 427-04)
- D. Pengujian distribusi ukuran butiran
 - Analisa saringan (ASTM D 422-63)
 - Analisa hidrometer (ASTM D 442-63)
- E. Pengujian pemadatan standar (ASTM D 698-00)
- F. Pengujian CBR (ASTM D 1883-99)
- G. Pengujian potensi pengembangan (ASTM D 1883-99)

3. Pembuatan Benda Uji

Tanah asli yang telah diuji sifat fisik dan mekanisnya, dicampurkan dengan kapur, *fly ash* dan *bottom ash* dalam lima variasi campuran. Berat kapur, *fly ash* dan *bottom ash* dihitung terhadap berat kering tanah. Variasi campuran benda uji tersebut ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Campuran Benda Uji

No.	Jenis Sampel	Komposisi
1	Variasi 1 (V ₁)	Tanah Asli + 5% Kapur + 20% <i>Bottom Ash</i> + 10% <i>Fly Ash</i>
2	Variasi 2 (V ₂)	Tanah Asli + 5% Kapur + 20% <i>Bottom Ash</i> + 15% <i>Fly Ash</i>
3	Variasi 3 (V ₃)	Tanah Asli + 5% Kapur + 20% <i>Bottom Ash</i> + 20% <i>Fly Ash</i>
4	Variasi 4 (V ₄)	Tanah Asli + 5% Kapur + 20% <i>Bottom Ash</i> + 25% <i>Fly Ash</i>
5	Variasi 5 (V ₅)	Tanah Asli + 5% Kapur + 20% <i>Bottom Ash</i> + 30% <i>Fly Ash</i>

4. Pengujian Sifat Fisik dan Mekanis Tanah Setelah Distabilisasi

Pengujian terhadap tanah hasil stabilisasi dilakukan untuk mengetahui kapasitas dukung tanah tersebut melalui nilai CBR. Namun terlebih dahulu dilakukan pengujian sifat-sifat fisik dan mekanis yang sama dengan pengujian tanah asli. Uji CBR sendiri, baik yang terendam maupun tidak terendam dilakukan tanpa pemeraman dan melalui tujuh hari pemeraman. Variasi benda uji untuk pengujian CBR ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Variasi Benda Uji Untuk Pengujian CBR

No.	Variasi Benda Uji	Jenis Pengujian			
		0 Hari Pemeraman		7 Hari Pemeraman	
		CBR tanpa Perendaman	CBR dengan Perendaman	CBR tanpa Perendaman	CBR dengan Perendaman
1	Tanah Asli (TA)	2	2	-	-
2	Variasi 1 (V ₁)	2	2	2	2
3	Variasi 2 (V ₂)	2	2	2	2
4	Variasi 3 (V ₃)	2	2	2	2
5	Variasi 4 (V ₄)	2	2	2	2
6	Variasi 5 (V ₅)	2	2	2	2
Total per Bagian		12	12	10	10
Total Benda Uji		44			

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Tanah Asli

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik dan mekanik di laboratorium, karakteristik tanah asli dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik Tanah Asli

No	Parameter	Hasil
----	-----------	-------

A. Pengujian Sifat Fisik		
1	Kadar air (w)	23,89 %
2	Berat jenis spesifik (<i>specific gravity</i>)	2,66
3	Batas cair (<i>liquid limit</i>)	70,24 %
4	Batas plastis (<i>plastic limit</i>)	29,68 %
5	Batas susut (<i>shrinkage limit</i>)	9,50 %
6	Indeks plastisitas (<i>plasticity index</i>)	40,56 %
7	Butiran lolos saringan No. 200 (butiran halus)	96,65 %
8	Butiran tertahan saringan No. 200 (butiran kasar)	3,35 %
B. Pengujian Sifat Mekanik		
1	Kadar air optimum	33,59 %
2	Berat volume kering maksimum	1,29 gr/cm ³
3	CBR terendam (<i>soaked</i>)	1,14 %
4	CBR tak terendam (<i>unsoaked</i>)	1,41 %
5	Potensi pengembangan	5,59 %

3.2. Klasifikasi Tanah Asli

Pada umumnya, ada dua sistem klasifikasi tanah yang digunakan berdasarkan distribusi ukuran butiran dan batas-batas Atterberg, yakni sistem klasifikasi AASHTO dan sistem klasifikasi USCS (Das 2009). Berdasarkan sistem AASHTO tanah asli masuk dalam jenis tanah A-7-6 (1560). Adapun berdasarkan sistem USCS tanah asli tergolong dalam kelompok CH, yang merupakan lempung non organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi.

3.3. Karakteristik Bahan Stabilisasi

Bahan stabilisasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah kapur (K), *fly ash* (FA) dan *bottom ash* (BA). Berdasarkan penelitian Ullu, Hangge and Bella (2020) kadar CaO dalam kapur adalah sebesar 62,94%, dan menurut Dom, Hangge and Cornelis (2021) *fly ash* memiliki nilai CaO sebesar 10,64%. Menurut *Canadian Standard CSA A-23.5*, *fly ash* dengan kadar CaO yang berkisar antara 8-20% termasuk dalam tipe CI. Adapun berdasarkan hasil pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) di Laboratorium PT. Sucofindo Surabaya pada bulan Oktober 2021, diketahui *bottom ash* yang digunakan mengandung kadar CaO sebesar 13,92%. Selanjutnya bahan stabilisasi yang ada diuji sifat fisiknya, yakni uji kadar air, berat jenis spesifik dan analisa saringan. Nilai hasil pengujian tercantum pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristik Bahan Stabilisasi

No	Parameter	K	FA	BA
1	Kadar air (w)	13,25 %	1,71 %	0,27 %
2	Berat jenis spesifik (<i>specific gravity</i>)	2,32	2,21	2,09
3	Lolos saringan No. 200 (butiran halus)	52,58 %	75,47 %	7,73 %
4	Tertahan saringan No. 200 (butiran kasar)	47,42 %	24,53 %	92,27 %

3.4. Pengaruh Stabilisasi Terhadap Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif

Stabilisasi tanah dilakukan dengan mencampur tanah asli (TA) dengan 5% kapur, 20% *bottom ash* dan *fly ash* dalam lima variasi campuran yakni 10% (V1), 15% (V2), 20% (V3), 25% (V4) dan 30% (V5) dari berat kering tanah. Hasil pengujian yang diperoleh tercantum pada Tabel 5.

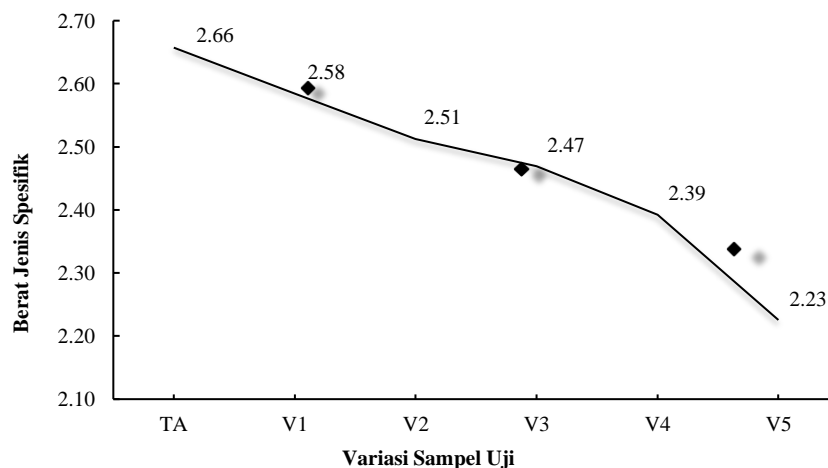
Tabel 5. Hasil Pengujian Sifat Fisik Dan Mekanis Tanah Setelah Distabilisasi Dengan Kapur (K), *Fly Ash* (FA) dan *Bottom Ash* (BA)

No	Pengujian	5% K + 20% BA				
		10% FA	15% FA	20% FA	25% FA	30% FA

	(V1)	(V2)	(V3)	(V4)	(V5)
1 Berat Spesifik	2,58	2,51	2,47	2,39	2,23
2 Batas Cair (%)	53,11	50,44	48,63	46,26	44,21
3 Batas Plastis (%)	27,42	26,29	25,19	24,10	22,60
4 Batas Susut (%)	32,44	37,51	45,68	52,81	59,49
5 Indeks Plastisitas (%)	25,69	24,15	23,43	22,16	21,61
6 Butiran lolos saringan No. 200 (%)	81,58	80,60	79,69	78,42	77,49
7 Butiran tertahan saringan No. 200 (%)	18,42	19,40	20,31	21,58	22,51
8 Kadar air Optimum (%)	31,60	30,28	27,81	26,38	25,19
9 Berat Volume Kering Maksimum (gr/cm ³)	1,32	1,34	1,37	1,40	1,42
10 CBR Terendam Tanpa Pemeraman (%)	2,99	4,75	6,97	10,38	12,85
11 CBR Terendam 7 Hari Pemeraman (%)	3,53	5,44	7,78	11,33	14,06
12 CBR Tak Terendam Tanpa Pemeraman (%)	4,13	6,33	8,88	12,61	15,33
13 CBR Tak Terendam 7 Hari Pemeraman (%)	4,79	7,29	10,14	14,24	16,66
14 Pengembangan Tanpa Pemeraman (%)	4,84	3,72	2,97	2,06	1,12
15 Pengembangan 7 Hari Pemeraman (%)	4,23	3,22	2,55	1,71	0,87

3.4.1. Berat Jenis Spesifik

Hasil pengujian berat jenis spesifik dari tanah asli dan tanah setelah distabilisasi ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan Variasi *Fly Ash* 10%, 15%, 20%, 25%, 30% Terhadap Nilai Berat Jenis Spesifik Tanah

Seiring penambahan stabilisator, nilai berat jenis spesifik mengalami penurunan. Besarnya penurunan yang terjadi berturut-turut adalah 3,01%, 5,64%, 7,14%, 10,15% dan 16,17% terhadap nilai berat jenis spesifik tanah asli. Penurunan ini disebabkan karena kapur, *fly ash* dan *bottom ash* memiliki nilai berat jenis spesifik yang lebih kecil daripada tanah lempung, yakni berturut-turut sebesar 2,32 ; 2,21 dan 2,09.

3.4.2. Batas-Batas Atterberg

Hasil pengujian tanah asli dan tanah setelah distabilisasi ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Batas-batas Atterberg

No	Variasi Benda Uji	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
----	-------------------	--------	--------	--------	--------

1	Tanah Asli (TA)	70,24	29,68	9,50	40,56
2	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20% <i>Bottom Ash</i> + 10% <i>Fly Ash</i> (V1)	53,11	27,42	32,44	25,69
3	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 15 % <i>Fly Ash</i> (V2)	50,44	26,29	37,51	24,15
4	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 20 % <i>Fly Ash</i> (V3)	48,63	25,19	45,68	23,43
5	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 25 % <i>Fly Ash</i> (V4)	46,26	24,10	52,81	22,16
6	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 30 % <i>Fly Ash</i> (V5)	44,21	22,60	59,49	21,61

Seiring penambahan stabilisator, nilai batas cair, batas plastis dan indeks plastisitas mengalami penurunan, sedangkan nilai batas susut mengalami peningkatan. Besarnya perubahan yang terjadi masing-masing dapat dijelaskan sebagai berikut :

A. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Nilai batas cair mengalami penurunan berturut-turut sebesar 24,39%, 28,19%, 30,77%, 34,14% dan 37,06% terhadap nilai batas cair tanah asli. Penurunan ini disebabkan karena tekstur *fly ash* yang sangat halus mengisi rongga pada tanah, dan ketika ditambahkan air maka akan saling mengikat dengan tanah tersebut (Tallama 2010). Selain itu sifat *bottom ash* mudah meloloskan air sehingga penyerapan air pada campuran tanah menjadi lebih sedikit, dan lebih mudah berubah dari keadaan plastis ke keadaan cair (Purnama 2017).

B. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Nilai batas plastis juga mengalami penurunan seiring dengan penambahan stabilisator. Besarnya penurunan yang terjadi berturut-turut adalah 7,61%, 11,42%, 15,13%, 18,80% dan 23,85% terhadap nilai batas plastis tanah asli. Penurunan ini disebabkan akibat reaksi penggumpalan antara tanah dengan kapur dan *fly ash*, yang memperkuat ikatan antar partikel menjadi butiran yang lebih keras, dan tanah mendekati sifat semi padat (Tallama 2010). Selain itu, sifat *bottom ash* yang mudah meloloskan air menyebabkan tanah lebih cepat mengalami retak sebelum mencapai diameter 3mm (Purnama 2017).

C. Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*)

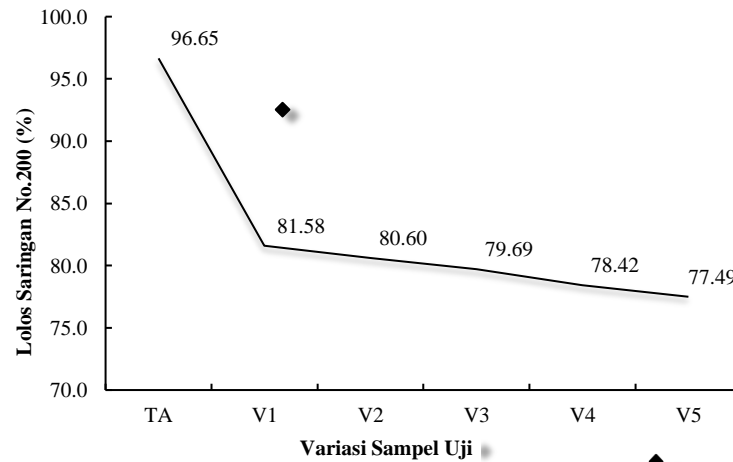
Nilai indeks plastisitas mengalami penurunan seiring dengan penambahan stabilisator. Besarnya penurunan yang terjadi berturut-turut adalah 36,66%, 40,46%, 42,23%, 45,36% dan 46,72% terhadap nilai indeks plastisitas tanah asli. Hal utama yang menyebabkan penurunan nilai indeks plastisitas adalah menurunnya nilai batas cair dan batas plastis.

D. Batas Susut (*Shrinkage Limit*)

Nilai batas susut mengalami peningkatan berturut-turut sebesar 3,41 ; 3,95 ; 4,81 ; 5,56 dan 6,26 kali dari nilai batas susut tanah asli. Peningkatan ini terjadi akibat menyatunya butiran stabilisator dengan tanah asli sehingga sifat kelembungan tanah menjadi berkurang. Hal ini menyebabkan kemampuan susut tanah berkurang, dan nilai batas susut mengalami kenaikan.

3.4.3 Distribusi Ukuran Butiran

Pengujian distribusi ukuran butiran terdiri dari uji analisa saringan dan analisa hidrometer. Hasil pengujian menunjukkan persentase tanah berbutir halus melalui persentase butiran yang lolos saringan No.200 seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan Variasi *Fly Ash* 10%, 15%, 20%, 25%, 30% Terhadap Gradasi Ukuran Butiran Tanah

Nilai persentase lolos saringan No.200 mengalami penurunan seiring dengan penambahan stabilisator. Besarnya penurunan yang terjadi berturut-turut adalah 15,59%, 16,61%, 17,55%, 18,86% dan 19,82% terhadap nilai persentase lolos saringan No.200 tanah asli. Hasil uji menunjukkan terjadinya perubahan komposisi fraksi tanah yaitu berkurangnya fraksi lempung dan bertambahnya fraksi pasir. Hal ini disebabkan karena adanya peningkatan butiran stabilisator yang ditambahkan, semakin banyak pula ikatan dengan butiran tanah asli, sehingga butiran tanah asli menjadi padat dan butiran lempungnya menjadi berkurang (Tallama 2010).

3.4.4. Pematatan Standar

Pengujian pematatan standar menghasilkan penurunan nilai kadar air optimum diikuti peningkatan nilai berat volume kering maksimum. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 7.

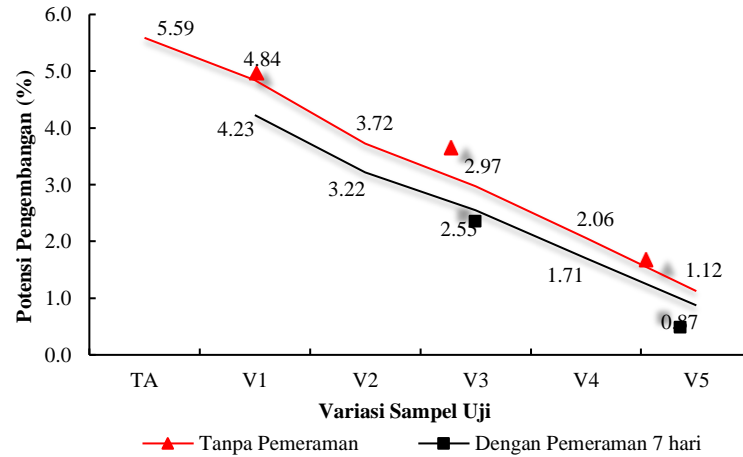
Tabel 7. Hasil Pengujian Pematatan Standar

No	Variasi Benda Uji	Kadar air optimum (%)	Berat Volume kering maksimum (gr/cm ³)
1	Tanah Asli (TA)	33,59	1,29
2	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20% <i>Bottom Ash</i> + 10% <i>Fly Ash</i> (V1)	31,60	1,32
3	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 15 % <i>Fly Ash</i> (V2)	30,28	1,34
4	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 20 % <i>Fly Ash</i> (V3)	27,81	1,37
5	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 25 % <i>Fly Ash</i> (V4)	26,38	1,40
6	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 30 % <i>Fly Ash</i> (V5)	25,19	1,42

Perubahan ini diakibatkan dari reaksi antara tanah dengan bahan stabilisator yang membentuk gumpalan dan mengisi rongga pori pada tanah. Akibatnya partikel padat pada tanah meningkat dan berat kering maksimumnya juga ikut meningkat. Selain itu, sifat kapur yang dapat memancarkan panas menyebabkan tanah asli menjadi cepat kering akibat proses hidrasi dan kadar air optimum mengalami penurunan (Sosrodarsono 2000).

3.4.5. Potensi Pengembangan

Tanah yang telah dipadatkan untuk pengujian CBR kemudian direndam selama empat hari untuk mendapatkan kondisi tanah jenuh air dan mengalami pengembangan maksimum (SNI 1732-1989). Pengujian dilakukan dengan dua perlakuan, yakni terhadap sampel yang tidak diperam dan diperam selama tujuh hari setelah dipadatkan di dalam *mould*. Hasil pengujian tersebut terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan Variasi *Fly Ash* 10%, 15%, 20%, 25%, 30% Terhadap Nilai Potensi Pengembangan Tanah

Penurunan nilai ini disebabkan karena adanya reaksi *pozzolanic* dan *cementious* yang memperkuat ikatan antar butiran tanah. Akibatnya penyerapan air menjadi lebih sedikit, diikuti penurunan nilai pengembangan tanah (Tallama 2010). Selain itu, besarnya penurunan sampel dengan tujuh hari pemeraman lebih besar dari sampel tanpa pemeraman. Hal ini diakibatkan oleh ikatan yang semakin kuat antara butiran tanah dengan stabilisator pada saat pemeraman berlangsung, rongga antar partikel tanah menjadi padat dan kekuatan tanah ikut meningkat.

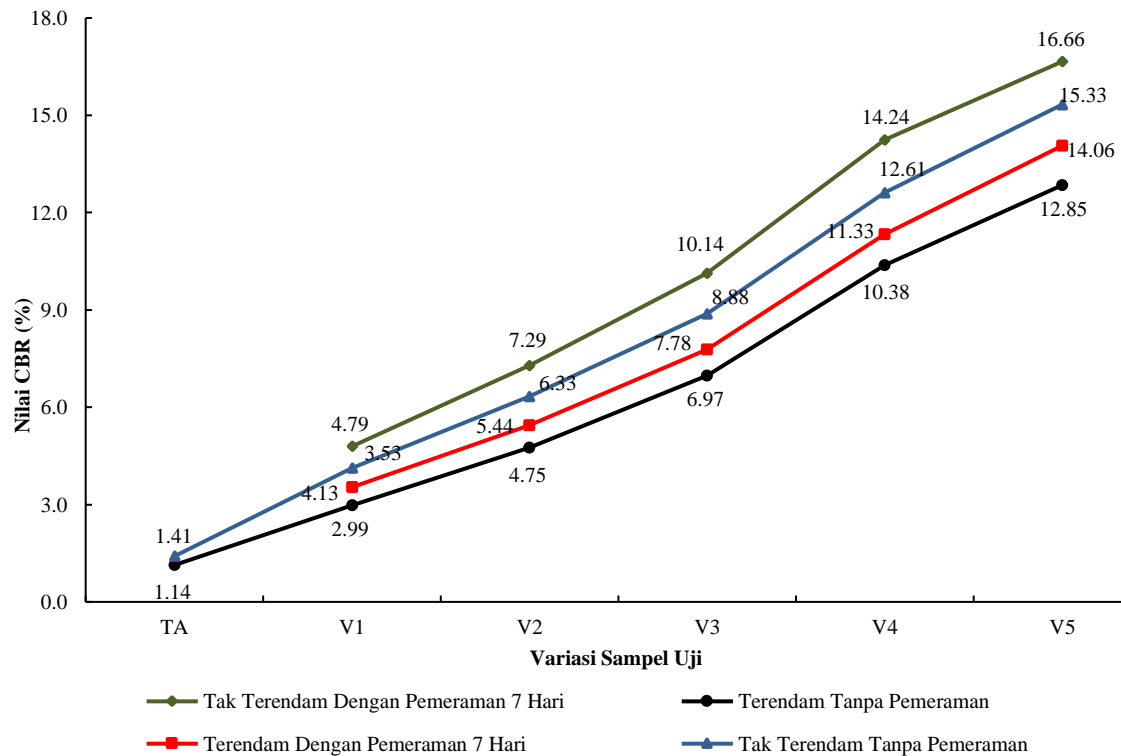
3.4.6. California Bearing Ratio (CBR)

Dalam penelitian ini, dilakukan empat jenis perlakuan terhadap variasi benda uji CBR, yakni CBR terendam (*soaked*) dan tak terendam (*unsoaked*), baik tanpa pemeraman maupun melalui tujuh hari pemeraman. Hasil pengujian CBR dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian *California Bearing Ratio (CBR)*

No	Variasi Benda Uji	CBR Terendam (%)	CBR Terendam + Peram (%)	CBR Tak Terendam (%)	CBR Tak Terendam + Peram (%)
1	Tanah Asli (TA)	1,14	-	1,41	-
2	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20% <i>Bottom Ash</i> + 10% <i>Fly Ash</i> (V1)	2,99	3,53	4,13	4,79
3	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 15 % <i>Fly Ash</i> (V2)	4,75	5,44	6,33	7,29
4	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 20 % <i>Fly Ash</i> (V3)	6,97	7,78	8,88	10,14
5	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 25 % <i>Fly Ash</i> (V4)	10,38	11,33	12,61	14,24
6	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Bottom Ash</i> + 30 % <i>Fly Ash</i> (V5)	12,85	14,06	15,33	16,66

Hubungan penambahan kapur 5%, *bottom ash* 20% dan *fly ash* untuk varian 10% - 30% terhadap nilai CBR tanah dengan empat perlakuan terlihat dalam grafik pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan Variasi *Fly Ash* 10%, 15%, 20%, 25%, 30% Terhadap Nilai *California Bearing Ratio* Tanah

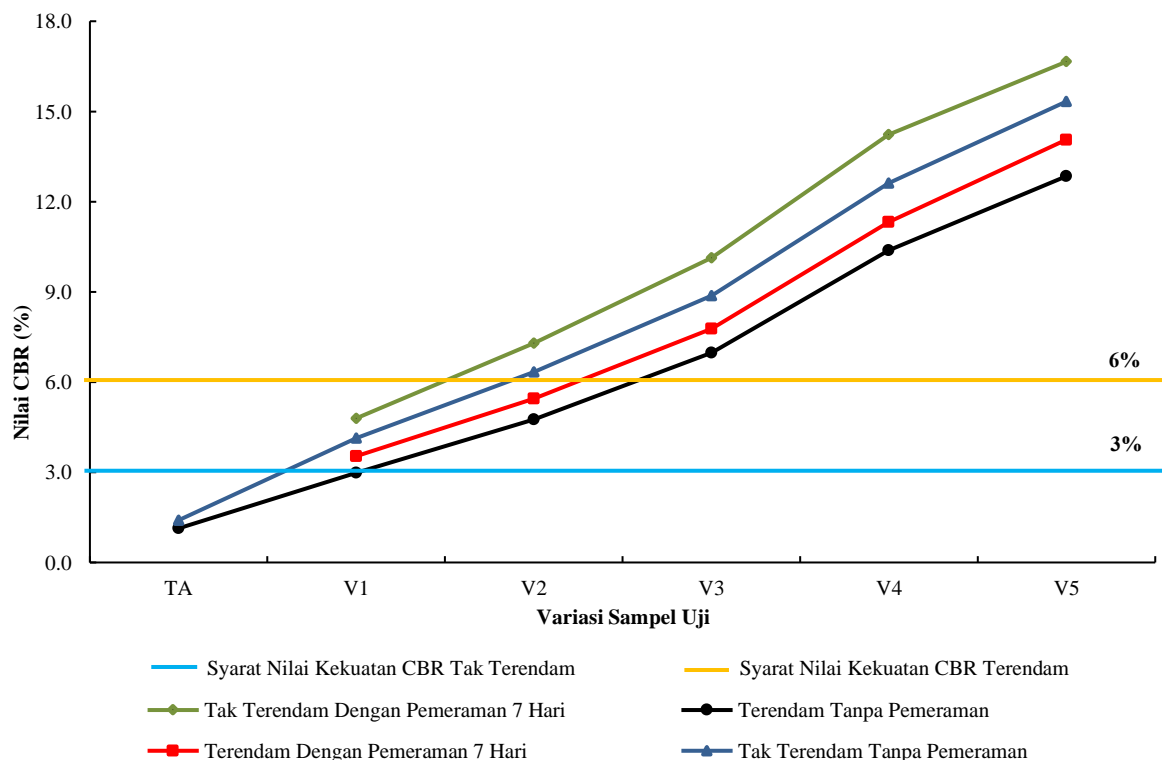
Dari empat model pengujian CBR pada Gambar 4, terlihat peningkatan nilai CBR tanah seiring penambahan stabilisator. Hal ini dikarenakan meningkatnya daya ikat antar butiran tanah akibat penggumpalan, sehingga tanah menjadi lebih keras dan kaku dan nilai CBR tanah tersebut ikut meningkat (Tallama 2010). Terlihat pula nilai CBR tak terendam lebih besar dibanding nilai CBR terendam. Hal ini adalah akibat dari peningkatan kadar air pada sampel tanah saat terendam, yang menyebabkan semakin lemahnya daya dukung tanah (Ullu, Hangge and Bella 2020). Selanjutnya waktu pemeraman sampel juga mempengaruhi proses pengikatan tanah dengan kapur dan *fly ash*, sehingga tanah akan semakin keras dan kaku. Selain itu, unsur kimia dari *bottom ash* akan diserap oleh permukaan butiran lempung yang bermuatan negatif, sehingga terjadi kenaikan nilai konsistensi serta kekuatan dari tanah lempung tersebut (Rahmayani 2016). Jika dibandingkan dengan penelitian Dom, Hangge and Cornelis (2021), hasil pengujian CBR terendam dan tak terendam dengan tujuh hari pemeraman sama-sama mengalami peningkatan untuk setiap variasi penambahan *fly ash*. Namun, peningkatan nilai CBR untuk campuran dengan kadar *fly ash* yang sama (10%, 20% dan 30%) lebih besar dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya. Peningkatan nilai CBR disebabkan karena pada penelitian ini campuran ditambahkan lagi dengan 20% *bottom ash*. Hal ini membuktikan bahwa penambahan *bottom ash* dalam variasi campuran dapat mengoptimalkan perbaikan nilai kapasitas dukung tanah lempung ekspansif. Secara lebih spesifik, perbandingan hasil pengujian CBR dari kedua penelitian dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Perbandingan Hasil Pengujian CBR tanpa dan dengan penambahan *Bottom Ash*

No	Variasi Benda Uji	CBR Terendam dengan Pemeraman (%)		CBR Tak Terendam dengan Pemeraman (%)	
		(Dom 2021)	(+) 20% <i>Bottom Ash</i>	(Dom 2021)	(+) 20% <i>Bottom Ash</i>
1	Tanah Asli + 5 % Kapur + 10% <i>Fly Ash</i>	1,95	3,53	3,04	4,79
2	Tanah Asli + 5 % Kapur + 20 % <i>Fly Ash</i>	3,12	7,78	5,79	10,14
3	Tanah Asli + 5 % Kapur + 30 % <i>Fly Ash</i>	4,22	14,06	7,14	16,66

3.5 Daya Dukung Tanah

Berdasarkan empat model pengujian CBR yang ada, semua nilai CBR mengalami peningkatan. Untuk nilai CBR terendam tanpa pemeraman, peningkatan maksimum diperoleh dari sampel V5. Besarnya peningkatan yang terjadi adalah dari 1,14% menjadi 12,85%. Adapula untuk nilai CBR terendam dengan pemeraman juga mengalami peningkatan maksimum pada variasi yang sama (V5), yakni dari 1,14% menjadi 14,06%. Selanjutnya untuk CBR tak terendam, sampel tanpa pemeraman mengalami peningkatan maksimum dari 1,41% menjadi 15,33% pada sampel V5. Yang terakhir, untuk sampel dengan pemeraman juga mengalami peningkatan maksimum pada V5, dari 1,41% menjadi 16,66%. Menurut SNI 03-1732-1989 syarat nilai kekuatan CBR untuk tanah dasar yaitu nilai CBR dalam kondisi terendam adalah >3% dan dalam kondisi kering adalah >6%. Berdasarkan syarat batas tersebut, dari hasil pengujian CBR dapat ditentukan variasi sampel uji yang memenuhi syarat sebagai bahan tanah dasar, melalui grafik pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Nilai CBR Terhadap Syarat Nilai Kekuatan CBR Untuk Kondisi Terendam dan Tak Terendam

Merujuk pada Gambar 5, sampel yang memenuhi syarat SNI untuk nilai CBR terendam adalah V2-V5 untuk sampel tanpa pemeraman, dan V1-V5 untuk sampel dengan pemeraman. Sampel tersebut menghasilkan nilai CBR > 3%. Selanjutnya sampel yang memenuhi syarat SNI untuk nilai CBR tak terendam adalah V2-V5, baik untuk sampel tanpa pemeraman maupun dengan pemeraman. Sampel tersebut menghasilkan nilai CBR > 6%.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, pengaruh stabilisasi terhadap sifat fisik dan mekanis tanah adalah nilai berat jenis spesifik, batas cair, batas plastis, indeks plastisitas, kadar air optimum dan potensi pengembangan tanah mengalami penurunan. Adapula nilai batas susut, berat volume kering dan nilai CBR tanah mengalami peningkatan seiring penambahan stabilisator. Nilai CBR maksimum untuk kondisi terendam dihasilkan dari sampel CBR dengan tujuh hari pemeraman, dengan nilai sebesar 14,06% pada campuran V5. Adapula untuk kondisi tak terendam, nilai CBR maksimum juga dihasilkan dari sampel CBR dengan tujuh hari pemeraman, dengan nilai sebesar 16,66% pada campuran V5. Dari nilai CBR yang ada, sampel V1 tidak memenuhi syarat untuk kondisi terendam (>3%) sampel tanpa pemeraman, dan untuk sampel dengan tujuh hari pemeraman kelima variasi yang ada memenuhi syarat. Selanjutnya, untuk kondisi tak terendam (>6%) sampel V1 tidak memenuhi syarat baik untuk sampel tanpa pemeraman maupun dengan tujuh hari pemeraman.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM. 1980. *Annual Books Of ASTM Standards (American Society For Testing Material)*. Philadelphia.
- U.S Department of Transportation. 2000. *Coal Bottom Ash / Boiler Slag-Material Description*. USA.
- Das, Braja M. 2009. *Principles Of Geotechnical Engineering (Ninth ed.)*. USA: Cengage Learning.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 1989. *Tata Cara Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya dengan Analisa Metode Komponen (SNI 1732)*. Jakarta.
- Hangge, E. E., Bella, R. A., & Ullu, M. C. 2020. "Pemanfaatan Fly Ash untuk Stabilisasi Tanah Dasar Lempung Ekspansif." *Jurnal Teknik Sipil* 10(1): 1-14.
- Hangge, E. E., Cornelis, R., & Dom, A. Y. 2021. "Pengaruh Fly Ash pada Stabilisasi Lempung Ekspansif terhadap Nilai Tegangan Geser dan CBR." *Jurnal Forum Teknik Sipil* 2(1): 1-11.
- Purnama, Yuda. 2017. "Pengaruh Penambahan Bottom Ash pada Tanah Lempung Ekspansif Terhadap Nilai Daya Dukung Pondasi Dangkal." *Ejournal Unesa* 2(5) :1-9.
- Rahmayani, A. 2016. "Kajian Efektifitas Penggunaan Semen dan Bottom Ash Terhadap Stabilitas Tanah Lempung Ditinjau dari Nilai CBR." Departemen Teknik Sipil, Universitas Nusa Sumatera Utara.
- Sosrodarsono, S. 2000. *Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Tallama, A. D., Rifa'i, Ahmad., Suryolelono, K. B. 2010. "Pemanfaatan Bahan Limbah Coal Ash untuk Lapisan Subgrade." Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.