

# EFEK PENAMBAHAN LIMBAH BATUBARA PADA LEMPUNG PLASTISITAS TINGGI TERSTABILISASI SEMEN TERHADAP CBR (THE EFFECT OF COAL WASTE ADDITION ON HIGH PLASTICITY CLAY STABILIZED WITH CEMENT ON CBR)

Syawal Satibi<sup>1\*)</sup>, Soewignjo Agus Nugroho<sup>1)</sup>, Agus Ika Putra<sup>1)</sup>, CR Zega<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Universitas Riau, Kota Pekanbaru, Indonesia

<sup>\*)</sup>syawal.satibi@lecturer.unri.ac.id

Diterima: 31 Oktober 2023; direvisi: 25 November 2024; disetujui: 01 Desember 2024;

## ABSTRAK

Lempung plastisitas tinggi (CH) mempunyai karakteristik material jelek, seperti kembang susut besar akibat plastisitas yang tinggi sehingga diperlukan perbaikan tanah, contohnya menggunakan semen dan limbah batubara (abu dasar dan abu terbang, BAFA). Tujuan penambahan semen dan BAFA tipe C adalah untuk melihat pengaruh terhadap perubahan nilai CBR tanah. Variasi penambahan BAFA sebesar 4%, 8%, 12% dan 16% dan semen PCC 3% dan 5%. Prosentase kandungan abu dasar terhadap abu terbang dalam BAFA adalah 2:1. Berdasarkan hasil pengujian terlihat peningkatan nilai daya dukung CBR dari 0,78% pada tanah asli, menjadi 18% pada sampel dengan campuran semen 5% dan BAFA 16% dengan pemeraman 7 hari. CBR sampel S<sub>5</sub>-B<sub>16</sub>-C<sub>7</sub> merupakan nilai yang terbesar dari seluruh variasi sampel. Kenaikan nilai CBR tersebut sangat besar dari 0,78% sampai dengan 18,73%. Hasil studi membuktikan bahwa kombinasi campuran mampu bekerja efektif untuk meningkatkan daya dukung tanah. Berdasarkan pengujian mikroskopik sampel CBR, dapat dilihat bahwa semakin tinggi kadar BAFA dan semen maka perubahan struktur sampel semakin terlihat lebih kasar dan pucat. Begitu juga sebaliknya, kadar BAFA yang paling kecil dan kadar semen yang paling kecil membuat struktur sampel lebih halus dan warna sampel lebih terang mendekati warna tanah asli. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa BAFA dapat digunakan sebagai campuran bahan perkerasan jalan dan memberikan solusi dampak lingkungan dari limbah industri.

**Kata Kunci:** abu dasar, abu terbang, CBR, stabilisasi semen, lempung plastisitas tinggi

## ABSTRACT

High plasticity clay (CH) has poor material characteristics, such as considerable shrinkage due to high plasticity, so soil improvement is needed, for example, using cement and coal waste (bottom ash and fly ash, BAFA). The purpose of adding cement and BAFA type C is to see the effect on changes in soil CBR values. Variations in BAFA addition are 4%, 8%, 12% and 16% and PCC cement 3% and 5%. The percentage of bottom ash content to fly ash in BAFA is 2:1. Based on the test results, an increase in the CBR bearing capacity value was seen from 0.78% in the original soil to 18% in samples with a mixture of 5% cement and 16% BAFA with 7 days of curing. The CBR sample S<sub>5</sub>-B<sub>16</sub>-C<sub>7</sub> is the largest value of all sample variations. The increase in the CBR value is huge from 0,78% to 18.73% This value proves that the combination of mixtures can effectively increase soil-bearing capacity. Based on microscopic testing of CBR samples, it can be seen that the higher the BAFA and Cement content, the rougher and paler the changes in the sample structure are. Conversely, the sample structure is smoother at the lowest BAFA content and cement content, and the sample colour is brighter, approaching the original soil colour. The results of this study indicate that BAFA can be used as pavement materials and provide a solution to the environmental impact of industrial waste.

**Keywords:** bottom ash, fly ash, CBR, cement stabilization, high plasticity clay

## PENDAHULUAN

*Bottom ash* dan *fly ash* (BAFA) merupakan bahan tambah (*additive*) yang diperoleh dari sisa batubara atau bahan residual (limbah) pembakaran batubara. Hasil pembakaran batubara dibedakan menjadi 2 (dua) material, yaitu abu terbang (*fly ash*) yang merupakan abu sisa pembakaran batubara yang ukuran butiran lebih kecil dari 0,074 mm (lolos sieve #200) dan abu dengan butiran yang tertahan sieve #200 yang merupakan abu dasar (*bottom ash*). Perbedaan utama dari abu dasar dan abu terbang adalah besaran unsur senyawa seperti kalsium, silika, aluminum, dan kadar besi. Data yang dikeluarkan oleh Kementerian

Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) tahun 2019, produksi batubara nasional sebesar 548 juta ton, dan jumlah produksi batubara tahun 2018 menghasilkan limbah BAFA sebesar 5% sampai 6% dari total produksi atau sebesar 27 juta ton sampai 37,4 juta ton (Dirjen ESDM, 2020). Beberapa perusahaan di Provinsi Riau, baik nasional maupun swasta yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar utama di antaranya PT IKPP, PT RAPP, dan PLTU Tenayan. Kandungan kimia *Fly ash* (FA) dan *bottom ash* (BA) dari PT IKPP telah diteliti oleh (Nainggolan, A. dan Muhandi, 2012) dan (Maharani, M. *et al.*, 2011) dengan hasil ditampilkan dalam Tabel 1.

**Tabel 1.** Kandungan kimia limbah batubara PT IKPP

Senyawa Kimia	ASTM C-618		BAFA PT IKPP	
	F	C	FA	BA
Oksida Silika (SiO <sub>2</sub> )			45,58	58,79
Oksida Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	>70	>50	37,53	20,33
Oksida Besi (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )			11,17	9,78
Trioxide Sulfur (SO <sub>3</sub> )	5	5		
Kalsium Oksida (CaO)	<10	>10	1,74	3,17
LOI			0,56	
Kadar Air (%)	3	3	0,70	3,06
Kehilangan panas	6	6		
Spesific Gravity			2,43	2,54*
unit weight (gr/cm <sup>3</sup> )			1,17	1,70

Keterangan : masuk rentang 1,90-2,60 sesuai dengan penelitian Kim (Kim, H., 2015)

**Tabel 2.** Kualitatif Derajat Kepadatan

Derajat Kepadatan (Dr, %)	Deskripsi
0 - 15	Sangat lepas
16 - 50	Lepas
51 - 70	Medium
71 - 85	Padat
86 - 100	Sangat Padat

Sumber:(Hardiyatmo 2010)

Nilai CBR mempunyai hubungan yang berbanding lurus dengan derajat kepadatan. Semakin besar nilai CBR, derajat kepadatan tanah juga semakin tinggi. Hubungan antara CBR lapangan dan laboratorium dapat dilihat dari persamaan nilai derajat kepadatan keduanya dan bisa dihitung, seperti yang terlihat pada Rumus (1) dan (2) (BSN, 2012), dan nilai kualitatif derajat kepadatan dapat dilihat pada Tabel 2.

$$CBR_{lab} = \frac{P_{(0,1/0,2)}}{P_{std}} * 100\% \dots \dots \dots (1)$$

$$CBR_{lab} = \frac{P_{(0,1/0,2)}}{P_{std}} * 100\% \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

P : beban saat penetrasi 0,1 atau 0,2 inch

Pstd : beban standar

Pemanfaatan abu terbang dan/atau abu dasar telah dilakukan oleh (Zulnasari *et al.*, 2021); (Soewignjo Agus Nugroho *et al.*, 2022); (Purnama, 2018), (Gunawan, W. N., Manoppo, F., dan Sarajar, 2018), dalam meningkatkan kuat geser tanah. Peningkatan nilai daya dukung (CBR) akibat penambahan abu terbang (FA) dan abu dasar (BA) juga dibuktikan oleh (Lembasi *et al.*, 2021), (Nugroho *et al.*, 2020), (Putra *et al.*, 2017). Pemanfaatan limbah batubara sebagai *additive* biasanya dikombinasikan dengan pozzolanic conventional seperti semen (Goodarzi *et al.*, 2016); (Vakili *et al.*, 2016); (Yadav dan Tiwari, 2017), (Nugroho, Fatnanta, dan Alridho, 2021) dan kapur ((Ihsan, A. R., Nugroho, S. A., dan Fatnanta, 2019); (Nugroho,

Fatnanta, Ongko, *et al.*, 2021b; Nugroho, Al Ridho, *et al.*, 2022; Nugroho, Ongko, *et al.*, 2022)). Hasil riset sebelumnya menyimpulkan bahwa kadar semen optimum berada dalam rentang 2% dan 7% dan kandungan kapur 5% sampai dengan 12%. Penggunaan abu terbang atau abu dasar sampai dengan 30% masih bisa meningkatkan kuat geser dan daya dukung tanah. Pemakaian abu batubara secara bersama (BAFA) juga masih berada pada rentang 10% dan 30%.

Penelitian stabilisasi tanah lempung dengan additive kapur; semen; abu sekam; abu terbang; dan sejenisnya sudah banyak dilakukan. Akan tetapi, pencampuran sampel untuk pengujian kuat geser dan CBR menggunakan kadar air masih berada pada kisaran nilai OMC. Stabilisasi lempung plastisitas tinggi (CH) dengan kapur; semen; dikombinasikan dengan abu terbang juga dilakukan pada kondisi kepadatan maksimum (OMC). Abu terbang sudah banyak digunakan untuk meningkatkan kuat geser tanah sementara limbah batu bara lainnya (abu dasar) masih sedikit sekali di manfaatkan. Stabilisasi lempung CH pada kadar air batas plastisitas rendah dan plastisitas tinggi (LL=50%) masih sedikit dilakukan.

Penelitian ini bertujuan memanfaatkan limbah abu dasar dan abu terbang, dengan kandungan abu dasar yang lebih tinggi, dikombinasikan dengan semen untuk stabilisasi tanah lempung plastisitas tinggi (CH) pada kadar air pencampuran 50%. Fokus penelitian adalah untuk mengetahui pengaruh semen dan limbah BAFA dalam meningkatkan daya dukung tanah dengan perbandingan kadar abu dasar dan abu terbang 2:1 dengan variasi berbeda-beda terhadap waktu pemeraman (*curing*).

## HIPOTESIS

Semen bisa meningkatkan kekuatan dan kepadatan tanah jika dikombinasikan dengan abu batubara yang mengandung silika, alumina, dan kalsium oksida yang bersifat pozzolanik akan membentuk ikatan dengan tanah yang kuat sehingga menurunkan plastisitas dan meningkatkan daya dukung sehingga meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan beban.

## METODOLOGI

### Peralatan dan Material

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini terdapat di Laboratorium Mekanika Tanah dan Batuan Jurusan Teknik Sipil Universitas Riau, di antaranya alat uji sifat fisik dan mekanik (alat CBR laboratorium). Alat uji Microscope Digital Portable dengan pembesaran sampai 1000x, dipakai untuk melihat ikatan antara butiran lempung, kapur, dan BAFA pada bidang terlemah (metode patahan) dan bidang irisan tertentu. Tanah lempung plastisitas tinggi (CH) yang diambil dari Desa Muara Fajar, daerah sektor I pembangunan jalan tol Pekanbaru - Dumai, terletak di Kecamatan Rumbai, Pekanbaru. Abu terbang dan abu dasar diperoleh dari hasil pembakaran batubara yang diambil dari PT Indah Kiat (PT IKPP) Kabupaten Perawang Semen PCC produksi PT Semen Padang, yang mengandung gypsum 5 %, clinker/terak (batu kapur, pasir silika, pasir besi, dan lempung) 91%, serta material lain 4%.

### Metode Pengujian dan Variasi Sampel

Penambahan Limbah BAFA berpengaruh pada sifat fisik dan mekanik (*soil properties and shear strength*) serta daya dukung. Efek penambahan limbah BAFA, pada penelitian ini, meninjau dari perubahan nilai CBR dari tanah asli dan tanah asli dicampur semen serta BAFA. Komposisi campuran merupakan perbandingan berat kering dari tanah asli, semen, dan limbah BAFA. Pembuatan sampel uji CBR dilakukan dengan menambah kadar air sebesar 50% dari berat total campuran. Sampel dicampur secara merata kemudian dipadatkan pada *mold* CBR sesuai dengan pengujian Standard Proctor. Sampel uji CBR distabilisasi dengan semen pada kadar 3% dan 5% dan ditambah limbah BAFA. Kadar limbah BAFA yang dipakai sebesar 4%, 8%, 12%, dan 16%. Limbah BAFA terdiri atas abu dasar dan abu terbang dengan perbandingan 2 banding 1. Variasi dan Kode campuran lempung plastisitas tinggi (CH), semen, dan BAFA dirangkum dalam Tabel 3.

**Tabel 3.** Kode Campuran Sampel Uji CBR

Variasi Campuran	Kode	Cement (%)	BAFA (%)
Tanah Asli (CH)	A	-	-
CH+3% C+4% BAFA	C3-B4	3	4
CH+3% C+8% BAFA	C3-B8	3	8
CH+3% C+12% BAFA	C3-B12	3	12
CH+3% C+16% BAFA	C3-B16	3	16
CH+5% C+4% BAFA	C5-B4	5	4
CH+5% C+8% BAFA	C5-B8	5	8
CH+5% C+12% BAFA	C5-B12	5	12
CH+5% C+16% BAFA	C5-B16	5	16

Persentase campuran antara abu dasar dan abu terbang adalah dua bagian abu dasar (2/3) dan satu bagian abu terbang (1/3) dari banyaknya kandungan BAFA. Sebagai contoh, pada kadar BAFA 12%, maka abu dasar sebesar 8% dan abu terbang sebesar 4%. Pemanfaatan abu dasar yang tidak semasih abu terbang menjadi dasar pemilihan persentase ini. Alasan pemilihan kadar air campuran sebesar 50% adalah karena kadar air tersebut sama dengan nilai batas liquid limit lempung plastisitas rendah dan plastisitas tinggi pada Atterberg Limit chart. Sampel diuji setelah diperam (*curing*) selama 7 hari untuk dianalisis perubahan kadar air selama pemeraman terhadap nilai CBR kondisi tanpa rendaman (*unsoaked*).

## HASIL DAN ANALISIS

### Pengujian Propertis Tanah Asli

Hasil Pengujian *Specific Gravity* (Gs) pada tanah dasar mendapatkan nilai 2,61. Hasil pengujian Proctor standard Laboratorium mendapatkan data kadar air optimum (OMC) sebesar 32,25% dan kepadatan kering maksimum (MDD) sebesar 13,82 kN/m<sup>3</sup>. Kadar asli pada saat pengambilan sampel di lapangan adalah 46,24%. Kadar air pembuatan sampel untuk menentukan harga CBR laboratorium tanah asli ditetapkan di atas nilai OMC, yaitu sebesar 50%. Nilai UCS (qu), lempung MH

(*remoulded*) pada kadar air 50%=21,10 kPa dan plastisitas tanah asli (A) dan campuran yang lain ditampilkan pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Hasil Pengujian Plastisitas Tanah

	LL (%)	PL (%)	IP (%)	SL (%)
A	69,60	32,40	37,20	17,30
C3-B4	60,60	25,40	35,20	17,50
C3-B8	53,30	23,40	29,90	18,00
C3-B12	54,60	30,60	24,00	19,90
C3-B16	55,55	33,30	22,25	20,50
C5-B4	57,80	36,30	21,50	24,60
C5-B8	59,35	39,60	19,75	27,50
C5-B12	56,00	42,15	13,90	32,00
C5-B16	52,90	45,70	7,20	38,70

Berdasarkan nilai UCS, sampel yang diuji pada kadar air 50% dan pengujian batas-batas Atterberg pada tanah asli (Tabel 4). USCS menggolongkan tanah asli termasuk pada kategori lempung plastisitas tinggi dengan konsistensi sangat lunak (*very soft clay*). Tabel 4 juga menyimpulkan bahwa penambahan BAFA lebih dari 8% akan meningkatkan nilai batas plastis (PL) dan batas cair (kadar semen 3%). Secara umum, penambahan semen menyebabkan penurunan batas cair. Tanah di lokasi yang sama, kuat geser UCS sampel pada kadar air sekitar OMC telah dilakukan Nugroho (Nugroho, *et al.*, 2022) dan memperoleh hasil 182 kPa - 252 kPa. Nilai qu pada lempung CH berbeda signifikan apabila diuji pada kadar air sekitar OMC dengan kadar air sekitar batas cair (50%).

### Hasil Pengujian CBR (California Bearing Ratio)

Data-data yang diperoleh dari penelitian ini berasal dari serangkaian pengujian yang dilaksanakan di laboratorium, kemudian disajikan secara sistematis dan jelas sehingga dapat dilakukan analisa. Data-data yang diperoleh, yaitu harga CBR (%), Kadar air (%) ditampilkan pada Tabel 5.

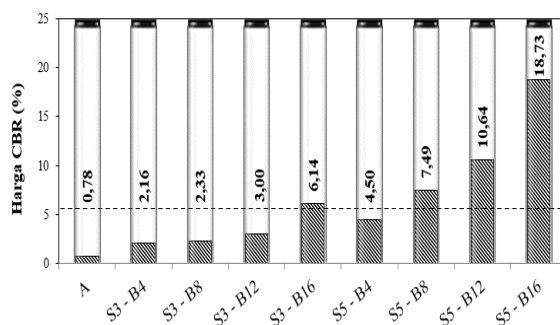
**Tabel 5.** Hasil Pengukuran kadar air dan Pengujian CBR

Kode Variasi Campuran	Kadar Air (curing 7 hari)		CBR (%)
	before (%)	after (%)	
CH (A)	50,00	48,55	0,78
CH-C3-B4	45,79	45,50	2,16
CH-C3-B8	44,00	43,50	2,33
CH-C3-B12	41,50	41,17	3,00
CH-C3-B16	39,50	36,70	6,37
CH-C5-B4	46,50	46,24	4,50
CH-C5-B8	44,50	41,56	7,49
CH-C5-B12	42,50	36,76	10,64
CH-C5-B16	40,50	32,30	18,73

Merujuk Tabel 5, pada kadar semen yang sama (3% atau 5%), penambahan BAFA sesaat setelah dicampur membutuhkan air untuk bereaksi dengan lempung dan semen. Semakin tinggi kadar BAFA, akan membutuhkan air lebih banyak untuk bereaksi antara lempung dan BAFA serta semen. sehingga kadar air setelah pencampuran turun lebih besar. Semakin tinggi kadar semen atau BAFA, maka akan membutuhkan air lebih banyak sehingga kadar air setelah pencampuran turun lebih besar. Hal ini juga terjadi pada saat proses pemeraman selama 7 hari. Semakin tinggi kandungan BAFA, kehilangan air semakin besar.

### Hubungan Harga CBR dengan Kadar Air

Hasil pengujian CBR laboratorium ditampilkan dalam bentuk diagram batang setiap variasi semen 3% (S<sub>3</sub>) dan semen 5% (S<sub>5</sub>) dapat dilihat pada Gambar 2.

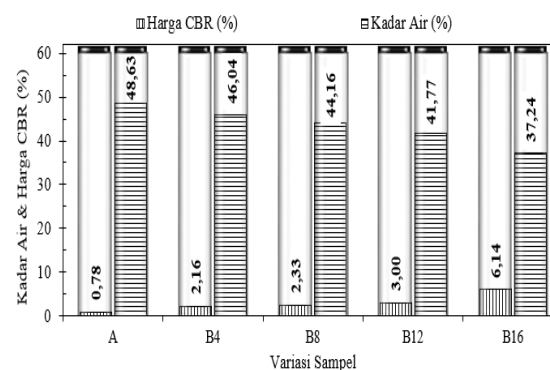


**Gambar 2.** Nilai CBR Campuran

Sampel tanah asli mempunyai harga CBR 0,78% dikarenakan kondisi sampel yang sangat

lunak (*very loose*) karena diuji pada kadar air 48,55% yang mendekati kondisi batas cair (60,60%) dan jauh di atas nilai OMC (32,35%). Hasil pengujian kadar air sampel menunjukkan bahwa jika semakin dekat dengan nilai batas cair (LL) maka kondisi tanah semakin plastis. Pada sisi basah ( $w > OMC$ ), kepadatan tanah semakin tinggi dengan semakin dekat dengan nilai OMC demikian juga harga CBR. Nilai CBR terbesar terjadi pada kondisi kadar air di harga OMC. Hasil yang diperoleh juga menjelaskan variasi sampel dengan kadar semen 3% (S<sub>3</sub>) memiliki harga yang lebih rendah dengan sampel variasi semen 5% (S<sub>5</sub>). Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) menyatakan bahwa harga minimum untuk CBR Subgrade jalan sebesar 6% (DJBM 2020). Stabilisasi dengan 3% semen hanya ditambah BAFA 16% yang memenuhi syarat. Sementara itu, pada stabilisasi dengan semen 5%, penambahan BAFA lebih dari 4%. Penggunaan abu terbang terbukti dapat menggantikan semen dengan membandingkan harga CBR pada kadar semen 3% (BAFA 16%) dengan kadar semen 5% (BAFA 8%) mempunyai harga CBR yang hampir sama. Ini sesuai dengan penelitian Zhang (*Zhang et al., 2023*) yang menyimpulkan bahwa penggunaan abu terbang bisa mengurangi penggunaan semen.

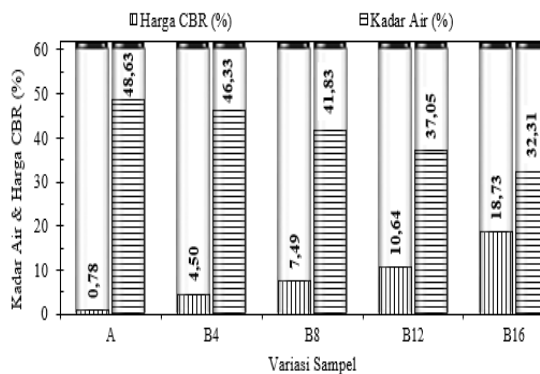
Hubungan kadar air (%) dan harga CBR (%) pada penelitian ini merupakan hubungan berbanding terbalik antara kenaikan kadar air dengan penurunan harga CBR, seperti yang terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



**Gambar 3.** Hubungan nilai CBR dan Kadar Air (Semen 3%)

Berdasarkan Gambar 3, jelas dengan semakin tinggi kadar air maka nilai CBR mengalami penurunan. Sebaliknya, semakin

rendah kadar air, maka nilai CBR mengalami peningkatan.

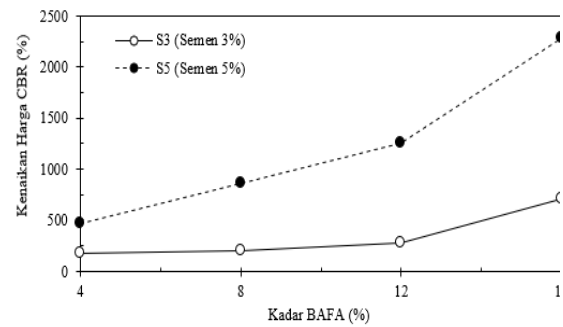


**Gambar 4.** Hubungan nilai CBR dan Kadar Air (Semen 5%)

Gambar 4 juga menjelaskan semakin tinggi kadar air membuat harga CBR mengalami penurunan. Nilai CBR berbanding terbalik dengan nilai kadar air. Semakin rendah kadar air maka harga CBR mengalami kenaikan. Tanah dengan kadar semen 5% dan BAFA 16%, setelah curing 7 hari, nilai kadar air campuran sebesar 32,30% mendekati kondisi OMC tanah asli (32,25%) sehingga harga CBR 18,73% merupakan nilai tertinggi dari variasi campuran. Tanah CH dari Muara Fajar, kondisi OMC dengan penambahan abu dasar 10% dan abu terbang 5%, yang diperbaiki dengan kapur 5% mempunyai harga CBR 47,21% (Nugroho dkk, 2021). Penambahan BAFA pada stabilisasi semen maupun kapur meningkatkan harga CBR.

#### Persentase Kenaikan Harga CBR

Hasil pengujian CBR laboratorium ditampilkan dalam bentuk diagram batang setiap variasi semen 3% ( $S_3$ ) dan semen 5% ( $S_5$ ) dapat dilihat pada Gambar 2. Keseluruhan harga yang didapat memiliki prosentase kenaikan nilai harga CBR yang berbeda-beda. Dalam hal ini seluruh sampel diperam (Curing) dalam jangka waktu sama, yaitu 7 hari, maka persentase kenaikan harga CBR dipengaruhi oleh banyaknya kandungan BAFA dan kadar semen. Rekapitulasi persentase kenaikan nilai CBR dapat dilihat pada Gambar 5.



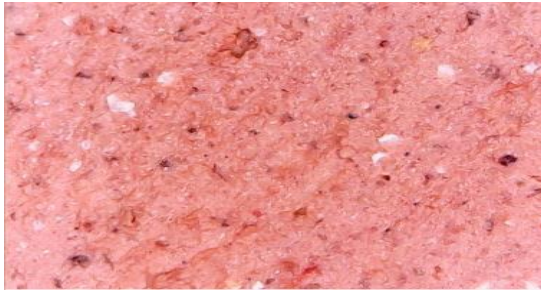
**Gambar 5.** Persentase Kenaikan Harga CBR Campuran

Gambar 5 menjelaskan persentase kenaikan harga BAFA antara variasi semen 3% dan semen 5%. Persentase kenaikan terbesar pada semen 3% terjadi pada kadar BAFA 12% sampai dengan 16%, dan sifat tersebut juga terjadi pada variasi semen 5% dan persentase terbesar terjadi pada BAFA 12% sampai dengan 16%.

#### Hasil Mikroskopik Tanah Asli dan Campuran

Apabila dua atau lebih material dicampurkan, campuran yang baik merupakan perpaduan homogen dari material yang tercampur. Homogenitas campuran bisa mengubah warna, gradasi, kuat geser, kompresibilitas, dan daya dukung. Untuk melihat reaksi kimia yang membentuk ikatan (*bounding*) antarmaterial yang lebih kuat sebelum dan setelah dicampur, bisa menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) atau XRD (*X-Ray Diffraction*). Untuk keperluan analisis sederhana, sebelum melihat lebih detail menggunakan SEM, digunakan mikroskop portabel sederhana yang bisa melakukan pembesaran sampai 1000x.

Hasil pemindaian (*scanning*) mikroskop dilihat pada dua (2) bagian, yaitu bagian patahan/retakan (bidang vertikal), yang merupakan bagian terlemah pada sampel (mengalami keruntuhan) saat pengujian dan irisan horizontal pada sampel. *Scanning* berupa gambar yang dianalisis dari ikatan struktur perubahan warna, dan luasan/volume rongga. Hasil peningkatan atau perubahan warna, luasan rongga berkaitan langsung dengan hasil pengujian CBR tanah asli dan CBR Campuran (Nugroho, Satibi, dan Raflyatullah, 2021).



(a)Metode Irisan



(b) Metode Patahan

**Gambar 6.** Pengujian Mikroskopik Sampel Tanah Asli Non-curing

Keseluruhan gambar sampel yang diperoleh mempunyai hubungan dengan beberapa parameter nilai yang saling mempengaruhi, seperti pengaruh penambahan kadar BAFA, kadar semen, dan pengaruh *curing* (Nugroho dan Satibi, 2022). Berikut pembahasan hasil gambar pengujian mikroskopik bagian dalam sampel dengan metode patahan dan irisan pada tanah asli yang diambil, seperti terlihat pada Gambar 6.

Merujuk pada Gambar 6a, tanah MH berwarna merah cerah dengan persentase butiran halus 94,6% dan pasir 5,4% yang tersebar merata. Pada metode patahan (pembesaran 100x), sampel asli dengan luasan 3x3 cm<sup>2</sup> terlihat pada Gambar 6b.

Harga CBR tanah asli yang nilainya 0,78% kondisi tanpa pemeraman menjadi pembanding dalam melihat perubahan (gradasi) warna, volume pori, dan gradasi ukuran butiran. Perubahan warna yang ditunjukkan Gambar 6, hasil mikroskopik sampel tanah CH, memperlihatkan butiran halus (lempung) berwarna merah cerah (merah bata) dan butiran pasir berwarna hitam.

Penambahan semen (biru) dan abu dasar (abu-abu) menyebabkan campuran lebih gelap. Semakin tinggi kadar BAFA dan semen, akan semakin gelap warna tanah. Abu dasar (abu-abu gelap) yang berupa butiran kasar, terpisah

menutup retakan sehingga volume lubang (pori) berkurang.

Metode irisan (Lampiran 1) mempunyai karakteristik butiran lempung yang banyak dan warna merah muda dan cerah seperti warna asli tanah lempung dan semakin terlihat pucat saat adanya penambahan BAFA dan semen. Terlihat juga pada Lampiran 1, patahan BAFA 16% (S<sub>3</sub>) dan BAFA 8% (S<sub>5</sub>) bentuk, volume, dan warna mirip sehingga harga CBR hampir sama. bahwa butiran tanah terlihat rapat dan merekat namun mempunyai sedikit rongga pori pada permukaannya. Metode patahan menjelaskan adanya garis patahan, menandakan garis tersebut merupakan bidang lemah (geser) dari keretakan sampel saat patahan dilakukan. Garis patahan pada campuran jumlah lebih banyak dan tegas pada kandungan BAFA 4% dibandingkan dengan kadar 8%. Semakin banyak garis patahan, ruang pori (volume pori/lubang) akan semakin besar sehingga penetrasi saat uji CBR lebih mudah. ini menyebabkan harga CBR lebih rendah.

## PEMBAHASAN

Berdasarkan pindaian (*scan*) mikroskopik sampel CBR maka dapat dilihat semakin tinggi kadar BAFA dan semen maka perubahan warna sampel semakin terlihat lebih kasar dan pucat. Begitu juga sebaliknya pada kadar BAFA yang paling kecil dan kadar semen yang paling kecil membuat struktur sampel lebih halus dan warna sampel lebih terang mendekati warna asli sampel tanah asli. Abu terbang bersama dengan PCC akan bereaksi dengan mineral lempung membentuk ikatan yang lebih kuat (gradasi warna), sementara abu dasar akan mengisi ruang pori dari tanah.

Peningkatan harga CBR mengindikasikan adanya peningkatan daya dukung tanah, yang berarti tanah menjadi lebih kuat dan stabil untuk mendukung beban struktur di atasnya. Penggunaan limbah abu dasar dan abu terbang tidak hanya meningkatkan nilai teknis tanah, tetapi juga memberikan solusi untuk masalah pengelolaan limbah industri. Penggunaan limbah ini dapat mengurangi biaya konstruksi karena mengurangi kebutuhan akan bahan stabilisasi konvensional dalam jumlah besar. Tanah hasil stabilisasi dapat digunakan sebagai bahan perkerasan jalan, terutama pada daerah

dengan ketersediaan tanah lempung plastisitas tinggi. Penggunaan bahan-bahan lokal dan limbah industri mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dengan meminimalkan dampak lingkungan.

Alternatif pemanfaatan limbah industri, yaitu abu batubara sebagai campuran stabilisasi tanah lempung plastisitas tinggi menunjukkan dapat meningkatkan nilai CBR secara signifikan. Limbah industri dapat dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi yang bernilai tambah, sekaligus memberikan solusi untuk masalah lingkungan, dan memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi stabilisasi tanah yang lebih berkelanjutan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Pelaksanaan stabilisasi tanah lempung dengan plastisitas tinggi di lapangan pada kadar air di sekitar nilai OMC sangat sulit karena sifat kembang susut yang tinggi. kandungan air yang rendah membuat tanah retak-retak. Pemasatan di lapangan lebih mudah dilakukan pada kondisi lunak, yaitu pada sisi basah. Berdasarkan hasil pengujian adanya peningkatan nilai daya dukung (CBR) yang awalnya pada tanah asli hanya sebesar 0,78% meningkat menjadi 18,73% dengan penambahan BAFA 16% dan di stabilisasi dengan semen PCC 5%. Peningkatan harga CBR tersebut adalah yang terbesar dari seluruh variasi campuran. Penambahan BAFA 16% dan PCC 5% terbukti menurunkan kadar air lempung CH. dari 50% menjadi 32,30% mendekati OMC tanah asli. Nilai kenaikan harga CBR cukup besar, yaitu dari 0,78% s.d 18,73% ini wajar karena perbedaan kondisi saat pengujian, yaitu pada kadar air kondisi LL dan kondisi OMC.

### Saran

Analisis yang lebih mendalam dan lebih komprehensif untuk penerapan teknologi stabilisasi tanah ini dalam skala yang lebih luas dengan: melakukan uji lapangan untuk verifikasi hasil laboratorium dan evaluasi kinerja stabilisasi dalam kondisi lapangan; melakukan analisis mikrostruktur untuk memahami mekanisme interaksi antara partikel tanah, semen, abu dasar, dan abu; serta melakukan *monitoring* jangka panjang untuk mengetahui

durabilitas stabilisasi dan pengaruh faktor lingkungan.

Penelitian lanjutan perlu mempertimbangkan beberapa aspek. Pertama adalah mengenai mekanisme peningkatan kekuatan tanah yang terjadi pada setiap jenis stabilisasi dan perbedaan perbedaan kekuatannya. Kedua berkaitan dengan proporsi campuran optimal antara abu dasar, dan abu terbang agar diperoleh nilai CBR yang maksimal. Ketiga adalah mengenai pengaruh gradasi butiran abu dasar dan ukuran partikel abu terbang terhadap kinerja stabilisasi. Keempat adalah mengenai waktu yang diperlukan untuk mencapai kekuatan maksimum setelah pencampuran. Kelima berkaitan dengan suhu, kelembapan, dan jenis tanah asli yang memengaruhi hasil stabilisasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih sebesar-besarnya atas kerja sama pada saat pengambilan sampai dengan pengolahan data kepada Sdr. Lala Monang Robert Zega dan Bapak Suratman. Terima kasih juga kepada Kepala laboratorium Mekanika Tanah, JTS-FT Unri beserta *assistant crew* dan laboran.

## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standar Nasional (BSN). *SNI 1744-2012, 'Metode Uji California Bearing Ratio Laboratorium'*. 2012. Jakarta
- Direktorat Jenderal Bina Marga (DJBM). (2020). *Spesifikasi Umum untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan Rev 2 2018*. kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2020. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara . *Kepmen ESDM No 301/2020, "Rencana Pengelolaan Mineral dan Batubara Nasional 2022-202"*. 2020. Jakarta.
- Goodarzi, A. R., Akbari, H. R., dan Salimi, M. (2016). Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. *Applied Clay Science*, 132–133, 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023>
- Gunawan, W. N., Manoppo, F., dan Sarajar, A. N. (2018). Analisis Stabilitas Tanah rawa Terhadap Embankment Jalan Tol Manado Bitung dengan Menggunakan semen yang Dipadukan dengan Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 6(3), 189–198.



- Hardiyatmo, H. C. (2010). Stabilisasi Tanah untuk Perkerasan Jalan. In *Stabilisasi Tanah untuk Perkerasan Jal*. Universitas Gajah Mada.
- Ihsan, A. R., Nugroho, S. A., dan Fatnanta, F. (2019). Perilaku Tanah lempung yang Distabilisasi dengan Abu Sekam Padi dan Kapur. *JOM FTEKNIK UNRIOM FTEKNIK UNRI*, 6(2), 1–12.
- Kim, H., K. (2015). Utilization of Sieved and Ground Coal Bottom Ash Powders as a Coarse Binder in High-Strength Mortar to Improve Workability. *Construction and Building Materials*, 2(1), 57–64.
- Lembasi, M. K., Nugroho, S. A., dan Fatnanta, F. (2021). Pengaruh Waktu Curing Terhadap Nilai Swelling Pada Tanah Lempung Dengan Campuran Fly Ash Dan Bottom Ash. *Dinamika Rekayasa*, 17(1), 56–65.
- Maharani, M., S., Muhardi, M., dan Fatnanta, F. (2011). *Karakteristik Abu Terbang dan Abu Dasar Dalam Geoteknik*.
- Nainggolan, A., S., dan Muhardi, M. (2012). Karakteristik Abu Terbang dan Abu Dasar Dalam Geoteknik. *JOM F TEKNIK UNRI*, 3(2), 1–8.
- Nugroho, S. A., Al Ridho, M. F., dan Fatnanta, F. (2022). Pengaruh Abu Sekam Kayu pada Nilai Unconfined Compression Strength Lempung Plastisitas Tinggi Terstabilisasi Semen Kapur. *TERAS JURNAL*, 12(1), 141. <https://doi.org/10.29103/tj.v12i1.688>
- Nugroho, S. A., Fatnanta, F., dan Alridho, M. F. (2021). Effect of Adding Wood Powder Ash on CBR Value in Stabilized High Plasticity Clay Cement and Lime. *ASTONJADRO*, 10(2), 301–307.
- Nugroho, S. A., Fatnanta, F., Ongko, A., dan Ihsan, A. R. (2021a). Behavior of High-plasticity Clay Stabilized with Lime and Rice Husk Ash. *Makara Journal of Technology*, 25(3). <https://doi.org/10.7454/mst.v25i3.3580>
- Nugroho, S. A., Fatnanta, F., Ongko, A., dan Ihsan, A. R. (2021b). Behavior of High Plasticity Clay Stabilized with Lime and Rice Hush Ash. *Makara Journal of Technology*, 25(3), 105–110. <https://doi.org/https://doi.org/10.7454/mst.v25i3.1544>
- Nugroho, S. A., Ningrum, P., dan Muhardi. (2020). Pemanfaatan Geopolimer Abu Terbang Sebagai Pozzolanic Tanah Lempung Untuk Material Tanah Dasar Perkerasan. *Jurnal Fondasi*, 9(1), 77–86.
- Nugroho, S. A., Ongko, A., Fatnanta, F., dan Putra, A. I. (2022). The Effect of WHA and Lime for Shear Strength of Clay Stabilized by Cement. *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan*, 24(1), 19–26. <https://doi.org/10.15294/jtsp.v24i1.34380>
- Nugroho, S. A., dan Satibi, S. (2022). Analisis Peningkatan Nilai CBR Lempung Plastisitas Tinggi Terstabilisasi Semen dan Abu Dasar. *PROKONS: Jurnal Teknik Sipil*, 16(1), 26–33. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33795/prokons.v16i1>
- Nugroho, S. A., Satibi, S., dan Raflyatullah. (2021). Pengaruh Penggunaan Semen dan Fly Ash terhadap Nilai CBR Tanah Lempung Muara Fajar. *Rekayasa Sipil (JRS-UNAND)*, 17(3), 267–278. <https://doi.org/https://doi.org/10.25077/jrs.17.3.267-278.2021>
- Purnama, Y. (2018). Pengaruh Penambahan Bottom Ash Pada Tanah Lempung Ekspansif di Daerah Lakarsantri Surabaya terhadap Nilai Daya Dukung Pondasi Dangkal. *Rekayasa Teknik Sipil*, 2(2), 1–9.
- Putra, M. D. H., Zaika, Y., dan Rachmansyah, A. (2017). Pengaruh Perbaikan Tanah Lempung Ekspansif Dengan Metode Deep Soil Mixing Pada Berbagai Kadar Air Lapangan Tanah Asli Terhadap Nilai CBR Dan Pengembangan. *Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil UB*, 7(1), 1–15.
- Soewignjo Agus Nugroho, Zulnasari, A., Fatnanta, F., dan Putra, A. D. (2022). Mechanical Behavior of Clay Soil Stabilized with Fly Ash and Bottom Ash. *Makara Journal of Technology*, 26(1), 1–7. <https://doi.org/10.7454/mst.v26i1.1444>
- Vakili, M. V., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., dan Keramatikerman, M. (2016). Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag. *Applied Clay Science*, 124–125, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.019>
- Yadav, J. S., dan Tiwari, S. K. (2017). Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement. *Applied Clay Science*, 149, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.037>
- Zhang, C., Zhu, Z., Zhang, Y., Liu, F., Yang, Y., Wan, Y., Huo, W., dan Yang, L. (2023). Engineering properties and optimal design of foam lightweight soil composite fly ash: An eco-friendly subgrade material. *Journal of Cleaner Production*, 429, 139631. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139631>
- Zulnasari, A., Nugroho, S. A., dan Fatnanta, F. 2021. Perubahan Nilai Kuat Tekan Lempung Lunak Distabilisasi Dengan Kapur dan Limbah Pembakaran Batubara. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 17(1), 24–36.

## LAMPIRAN

