



## **Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah**

**Ignatius Evan Yesa<sup>1</sup>, Trihanyndio Rendy Satrya<sup>2</sup>, Ria Asih Aryani Soemitro<sup>3</sup>**

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Email: [ignatiusevanyesa@gmail.com](mailto:ignatiusevanyesa@gmail.com), [trendysatrya@its.ac.id](mailto:trendysatrya@its.ac.id), [ria@ce.its.ac.id](mailto:ria@ce.its.ac.id)

---

**INFO ARTIKEL****ABSTRAK**

**Kata Kunci:** stabilitasi tanah; abu terbang dan kapur; Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR

Lapisan tanah dasar (*subgrade*) pada struktur perkerasan jalan merupakan lapisan yang paling krusial. *Subgrade* tidak hanya menopang beban jalan raya, namun juga beban akibat lapisan perkerasan di atasnya. Forshyte pada tahun 2014 mencoba memprediksi potensi pemanasan global menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil Kesimpulan Nilai kepadatan optimum untuk tanah yang distabilisasi dengan kapur sebesar 3%, 6%, dan 9% secara berurutan adalah 1,177 gr/cm<sup>3</sup>, 1,363 gr/cm<sup>3</sup>, 1,321 gr/cm<sup>3</sup>. Selanjutnya kepadatan kering optimum tanah yang distabilisasi dengan kapur sebesar 9% dan abu terbang dengan variasi kadar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% secara berurutan adalah 1,403 gr/cm<sup>3</sup>, 1,429 gr/cm<sup>3</sup>, 1,502 gr/cm<sup>3</sup>, 1,548 gr/cm<sup>3</sup>, dan 1,600 gr/cm<sup>3</sup>. Berdasarkan hasil serangkaian yang telah dilakukan, kadar zat aditif yang paling efektif dalam stabilisasi tanah yang digunakan adalah kapur sebesar 9% dan abu terbang sebesar 25%. Namun, dari hasil pengujian emisi karbon diketahui bahwa campuran tersebut menyebabkan emisi karbon dengan level mematikan, sehingga sebaiknya digunakan campuran kapur sebesar 9% dan abu terbang sebesar 25%.

**Keywords:** soil stabilization; fly ash and lime; Physical, Mechanical, and CBR Values

**ABSTRACT**

*The subgrade layer in the road pavement structure is the most crucial layer. The subgrade not only supports the load of the highway, but also the load due to the pavement layer above it. Forshyte in 2014 tried to predict the potential for global warming using the Life Cycle Assessment (LCA) method. Based on the research that has been done, it can be concluded that the optimum density value for soil stabilized with lime of 3%, 6%, and 9% respectively is 1.177 gr/cm<sup>3</sup>, 1.363 gr/cm<sup>3</sup>, 1.321 gr/cm<sup>3</sup>. Furthermore, the optimum dry density of soil stabilized with 9% lime and fly ash with varying levels of 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% respectively is 1.403 gr/cm<sup>3</sup>, 1.429 gr/cm<sup>3</sup>, 1.502 gr/cm<sup>3</sup>,*

---

1.548 gr/cm<sup>3</sup>, and 1.600 gr/cm<sup>3</sup>. Based on the results of a series that have been carried out, the most effective levels of additives in soil stabilization used are 9% lime and 25% fly ash. However, from the results of carbon emission testing, it is known that the mixture causes carbon emissions at a lethal level, so it is better to use a mixture of 9% lime and 25% fly ash.

---

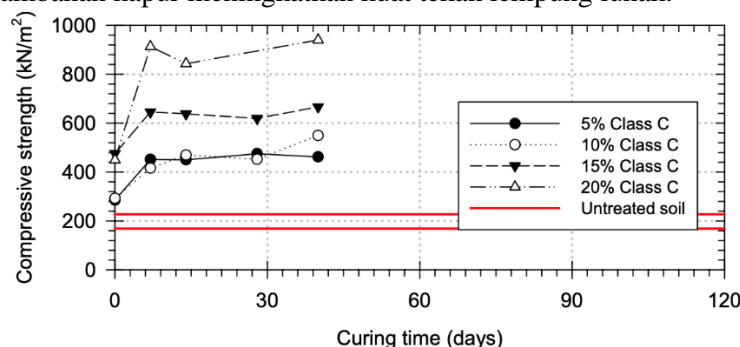
## PENDAHULUAN

Lapisan tanah dasar (*subgrade*) pada struktur perkerasan jalan merupakan lapisan yang paling krusial. *Subgrade* tidak hanya menopang beban jalan raya, namun juga beban akibat lapisan perkerasan di atasnya. Hal ini yang membuat *subgrade* harus memenuhi syarat menurut standar yang berlaku. Selain keharusannya untuk memenuhi syarat daya dukung, lapisan *subgrade* merupakan lapisan yang paling tebal dari semua lapisan pada struktur perkerasan jalan, sehingga volume kebutuhan untuk *subgrade* adalah yang paling besar, sedangkan tidak semua daerah memiliki tanah yang memenuhi syarat subgrade dengan volume yang besar. Akan lebih baik apabila kebutuhan akan *subgrade* dapat dipenuhi menggunakan tanah jenis apapun, yang tentunya akan diberi perlakuan agar bisa memenuhi syarat yang berlaku.

Teknologi perbaikan tanah sudah sejak lama dikembangkan oleh berbagai peneliti dan para ahli di segala penjuru dunia. Perkuatan tanah bisa dilakukan dengan instalasi cerucuk, dinding penahan tanah, geotekstile, geogrid, dan sebagainya. Sedangkan stabilisasi bisa dilakukan dengan menambahkan zat aditif untuk memperbaiki sifat fisis dan mekanis tanah. Secara umum, stabilisasi terbagi menjadi dua jenis, yaitu stabilisasi mekanis dan stabilisasi kimiawi.

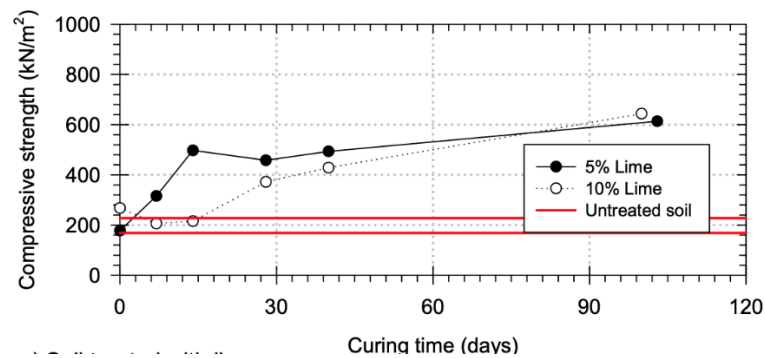
Zat aditif yang paling lumrah digunakan akhir-akhir ini adalah semen, kapur, dan abu terbang. Penggunaan semen dan kapur ditujukan untuk membentuk reaksi pozzolanic, yang menyebabkan sementasi antar partikel tanah. Sementasi tersebut mengikat partikel-partikel tanah halus sehingga daya dukung meningkat. Penggunaan abu terbang sebagai bahan tambah stabilisasi ditujukan untuk menjadi pengisi rongga-rongga dalam tanah karena ukuran butirannya yang terbilang halus. Selain itu kandungan mineral pada abu terbang diharapkan masih dapat sedikit bereaksi dengan mineral lempung. Peningkatan kualitas tanah dari aspek geoteknik akibat stabilisasi dengan kapur dan abu terbang dapat dilihat berdasarkan penelitian

yang dilakukan oleh Reyes dan Pando pada tahun 2007. Terlihat pada Gambar 1 bagaimana nilai kuat tekan tanah meningkat seiring dengan meningkatnya kadar abu terbang. Pada Gambar 2 juga dapat dilihat bagaimana penambahan kapur meningkatkan kuat tekan lempung lunak.



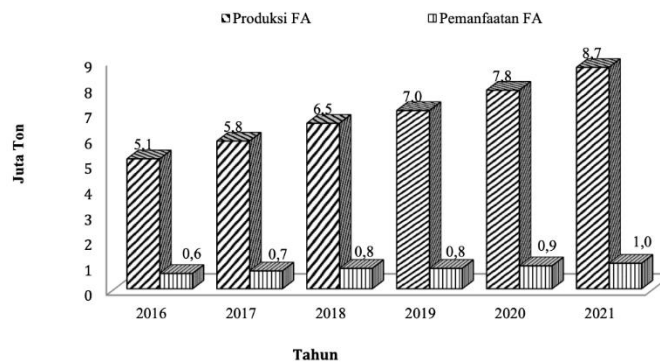
Gambar 0 Nilai kuat tekan bebas lempung lunak yang distabilisasi dengan abu terbang

## Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah



Gambar 2 Nilai kuat tekan bebas lempung lunak yang distabilisasi dengan kapur

Hal menarik dari penggunaan abu terbang adalah dari aspek lingkungan hidup. Kita ketahui bersama bahwa abu terbang merupakan hasil sampingan atau limbah dari proses pembakaran batu bara pada pembangkit listrik. Abu terbang yang dihasilkan cukup banyak sehingga apabila tidak dimanfaatkan akan menjadi sebuah masalah lingkungan. Namun, pada kenyataannya, Alfriansya dkk (2021) menyatakan bahwa pemanfaatan abu terbang di Indonesia masih sangat minim. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 3 Maka dari itu, penggunaan abu terbang sebagai stabilisator tanah juga merupakan salah satu cara untuk mengurangi limbah abu terbang.



Gambar 3 Produksi dan pemanfaatan abu terbang di Indonesia

Perlu diingat bahwa proses konstruksi sipil, dalam hal ini terkhusus pada bidang geoteknik, berupa stabilisasi tanah di lapangan, merupakan kegiatan yang berpotensi menyebabkan polusi yang sangat besar. Sumber polusi yang paling terlihat jelas berasal dari emisi CO<sub>2</sub> alat berat yang digunakan, baik alat yang digunakan untuk pengerjaan di lapangan, maupun kendaraan transportasi material. Forshyte pada tahun 2014 mencoba memprediksi potensi pemanasan global menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Gambar 1.4 dan Tabel 1.1 menggambarkan potensi pemanasan global yang terjadi akibat pekerjaan galian dan timbunan untuk beberapa skenario. Namun, selain itu semua, ada sumber polusi lain, yaitu keluarnya karbon yang sudah tersimpan di dalam tanah ke atmosfer dan menambah jumlah gas rumah kaca.

Tanah merupakan tempat penyimpanan karbon terrestrial terbesar di bumi. Sebagaimana diambil dari Scharlemann dkk. (2014), Gambar 1.5 menggambarkan persebaran karbon dalam tanah di bumi. Hal ini menyebabkan tanah memegang peranan penting dalam mengendalikan siklus karbon di bumi. Stokes dkk. pada tahun 2019 mengatakan bahwa metode untuk mencegah keluarnya karbon dari tanah dan menyimpan kembali karbon ke dalam tanah menjadi salah satu misi penting dalam rangka menyelamatkan lingkungan.

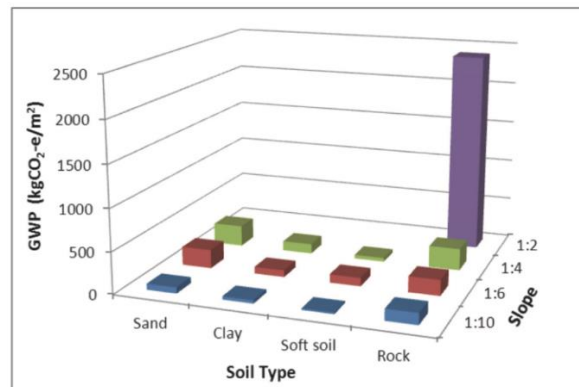
Namun justru karena tanah juga menyimpan cadangan karbon yang besar maka potensi karbon tanah untuk keluar ke atmosfer menjadi suatu ancaman nyata pencemaran lingkungan. Seperti akan

dijelaskan bahwa tanah menyimpan lebih dari 2400 GtC sedangkan seperti dilaporkan pada Yale School of The Environment pada tahun 2014, kita hanya memiliki “jatah” menghasilkan karbon sebesar 500 GtC saja.

Tabel 0 Perkiraan emisi gas rumah kaca akibat pekerjaan galian dan timbunan

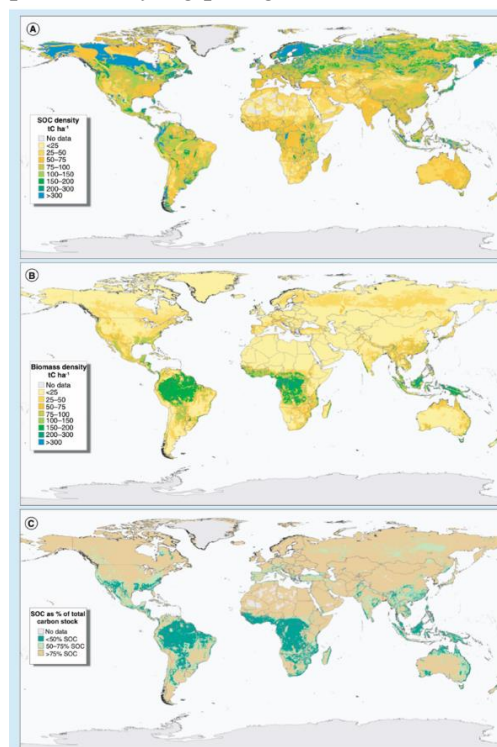
| Item<br>Slope | Sand                                   |      | Clay                                   |      | Soft Soil                              |      | Rock                                   |       |
|---------------|----------------------------------------|------|----------------------------------------|------|----------------------------------------|------|----------------------------------------|-------|
|               | BF                                     | GFA  | BF                                     | GFA  | BF                                     | GFA  | BF                                     | GFA   |
|               | (kgCO <sub>2</sub> -e/m <sup>2</sup> ) |      | (kgCO <sub>2</sub> -e/m <sup>2</sup> ) |      | (kgCO <sub>2</sub> -e/m <sup>2</sup> ) |      | (kgCO <sub>2</sub> -e/m <sup>2</sup> ) |       |
| 1:10          | 72.0                                   | 44.7 | 39.1                                   | 30.8 | 19.7                                   | 10.4 | 137.4                                  | 81.6  |
| 1:6           | 224.5                                  | 98.1 | 80.9                                   | 54.7 | 100.7                                  | 49.2 | 189.7                                  | 164.8 |
| 1:4           | 248.4                                  | 99.2 | 116.3                                  | 72.0 | 43.1                                   | 20.8 | 260.4                                  | 145.6 |
| 1:2           | -                                      | -    | -                                      | -    | -                                      | -    | 2394.7                                 | 892.5 |

Note: BF – Building footprint GFA – Gross floor area



Gambar 4 Grafik prediksi potensi pemanasan global akibat pekerjaan galian dan timbunan

Di sisi lain, pemanasan global merupakan sebuah masalah global yang sedang dialami seluruh dunia. Dampak-dampak pemanasan global yang terjadi sudah mulai dirasakan, seperti perubahan iklim, kekeringan, meningkatnya frekuensi kebakaran hutan, serta perubahan cuaca ekstrem. Seperti yang sudah menjadi pengetahuan umum bahwa pemanasan global terjadi dikarenakan gas rumah kaca. Salah satu gas rumah kaca dan dengan presentase yang paling besar adalah CO<sub>2</sub>.



# Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

Gambar 5 Distribusi kepadatan karbon secara global: (a) Karbon organik tanah pada lapisan topsoil, (b) Kandungan karbon secara global, (c) Presentase karbon dalam tanah dibandingkan karbon total.

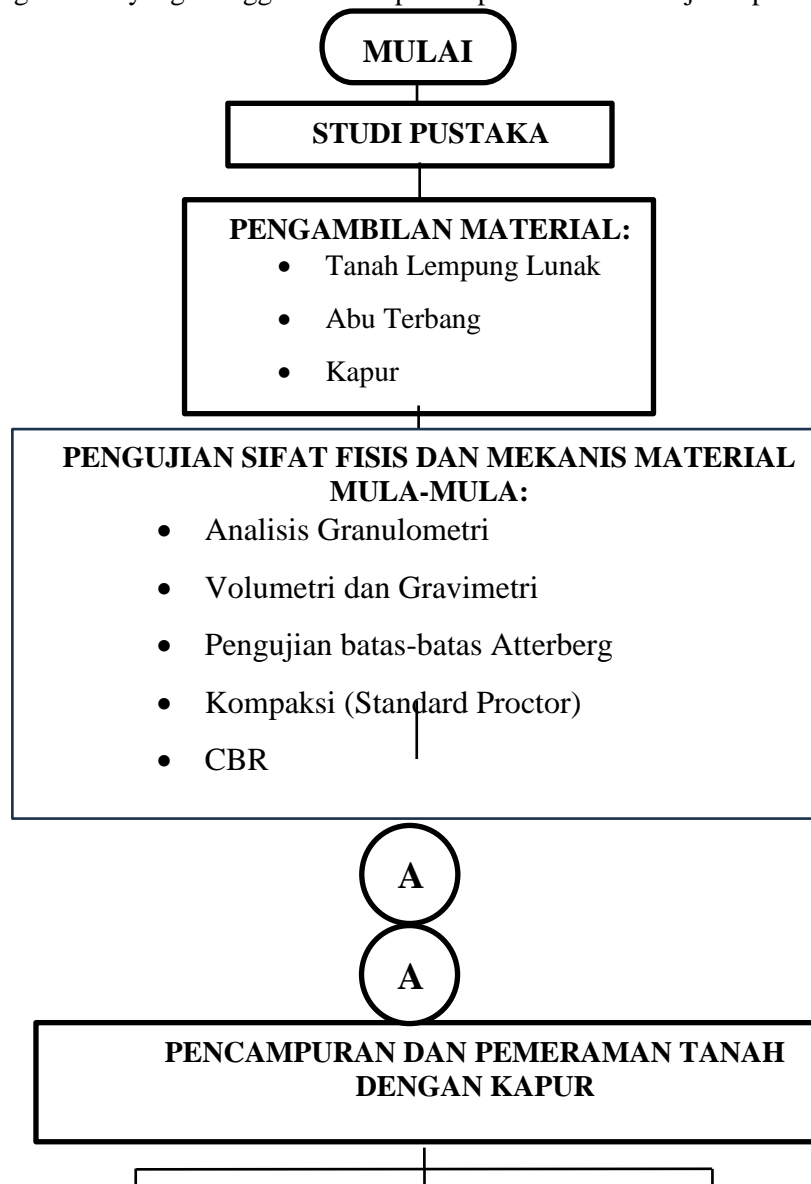
Dengan menyimak hal tersebut, menjadi pengingat bahwa pekerjaan geoteknik khususnya di Indonesia masih belum memperhatikan aspek lingkungannya. Penelitian yang ada masih fokus pada emisi karbon yang dihasilkan oleh peralatan yang digunakan pada proses pekerjaan. Padahal seperti yang sudah

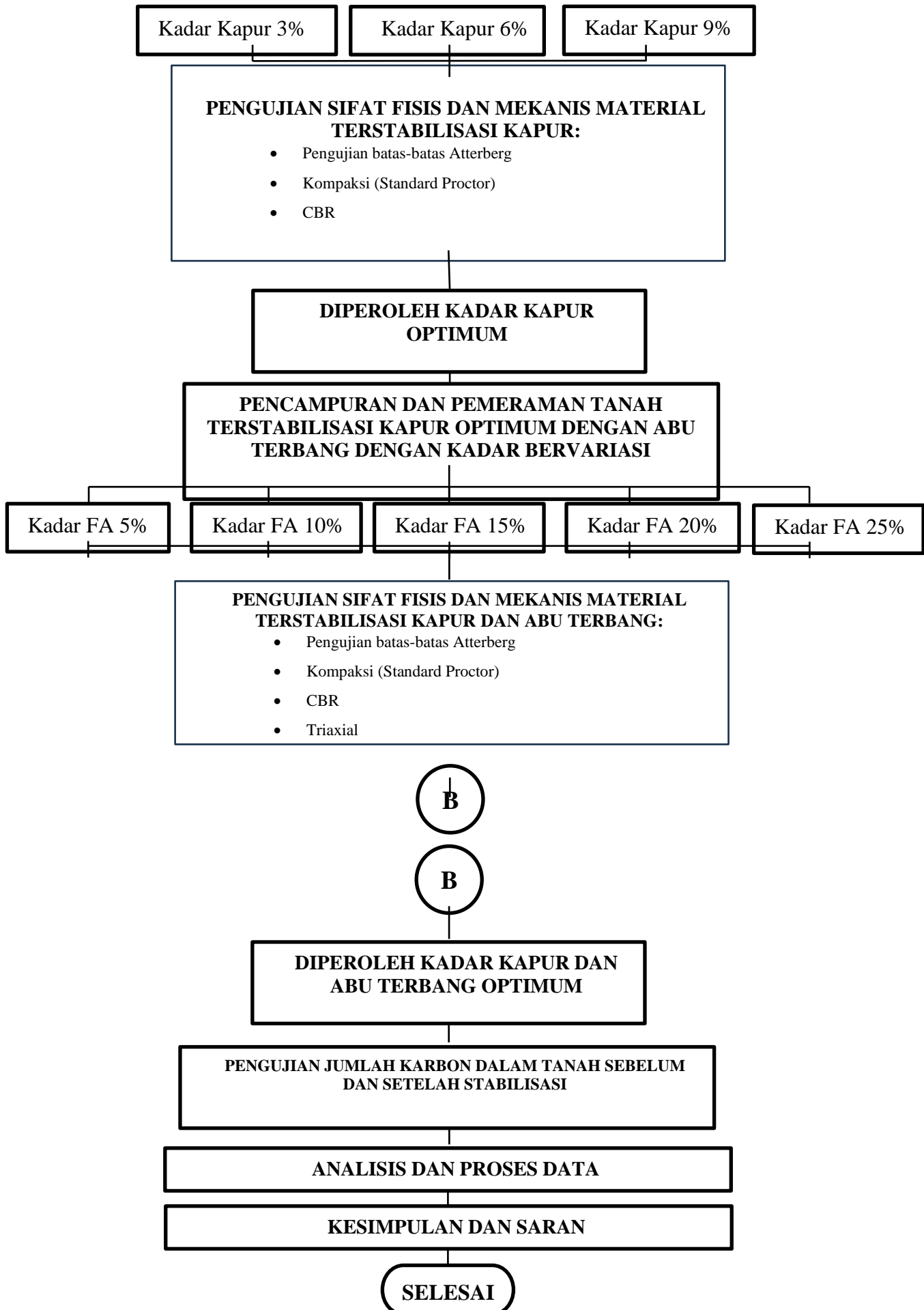
dijelaskan sebelumnya bahwa tanah merupakan kolam karbon terbesar di bumi, sehingga mengekspos karbon dalam tanah ke atmosfer bukan masalah yang bisa dianggap sepele. Maka dari itu dalam menjaga semangat pemeliharaan lingkungan maka penelitian ini akan ditujukan untuk mengukur berapa jumlah karbon pada tanah yang terlepas ke atmosfer selama proses pengerjaan stabilisasi tanah dengan tetap memperhatikan pengaruh dari stabilisasi yang dilakukan terhadap sifat-sifat tanah juga.

## METODE PENELITIAN

### Diagram Alir

Diagram alir yang menggambarkan proses penelitian ini disajikan pada Gambar 6





Gambar 7 Diagram alir penelitian

### Uraian Tahap

Tahapan penelitian secara umum dapat dilakukan dengan beberapa tahap, diantaranya terdiri dari studi pustaka, pengambilan material, stabilisasi, pengujian, analisis data, hasil dan pembahasan, kesimpulan dan saran dengan uraian sebagai berikut:

1. Studi Pustaka

Studi pustaka terkait topik penelitian yang sama dilakukan dengan mengacu pada penelitian-penelitian sebelumnya sehingga dapat menjadi dasar pada penelitian ini.

2. Pengambilan Material

Tanah yang digunakan pada penelitian ini diambil dari tanah di lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus Sukolilo, Surabaya. Untuk abu terbang dan kapur diambil di daerah Jawa Timur

3. Pengujian Sifat Fisik dan Mekanis Material

Pengujian sifat fisik dan mekanis material dilakukan untuk mengetahui kondisi mula-mula dan digunakan sebagai acuan awal penelitian ini. Adapun pengujian yang akan dilakukan adalah:

- a. Analisis Granulometri
- b. Pengujian kadar air dan berat isi
- c. Pengujian berat jenis
- d. Pengujian batas-batas Atterberg
- e. Pengujian nilai CBR
- f. Pengujian Triaxial

4. Pencampuran dan pemeraman tanah dengan kapur

Tanah distabilisasi menggunakan kapur terlebih dahulu untuk mendapat nilai kadar kapur optimum. Variasi kadar kapur yang digunakan adalah sebesar 3%, 6%, dan 9%. Setelah didapatkan kadar kapur optimum barulah tanah distabilisasi menggunakan kapur dengan kadar optimum dan abu terbang dengan kadar bervariasi

5. Pengujian sifat fisik dan mekanik tanah terstabilisasi kapur

Pengujian sifat fisik dan mekanik tanah terstabilisasi kapur dilakukan untuk mengetahui kadar kapur optimum dalam stabilisasi tanah. Adapun pengujian yang dilakukan adalah:

- a. Pengujian batas-batas Atterberg
- b. Pengujian nilai CBR
- c. Pengujian Triaxial

6. Pencampuran dan pemeraman tanah dengan kadar kapur optimum dan variasi kadar abu terbang

Tanah distabilisasi menggunakan kadar kapur optimum yang sudah diperoleh sebelumnya dan abu terbang dengan kadar yang bervariasi. Variasi kadar abu terbang adalah 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%.

7. Pengujian sifat fisik dan mekanik tanah terstabilisasi kapur dan abu terbang

Pengujian sifat fisik dan mekanik tanah terstabilisasi kapur dan abu terbang dilakukan untuk mengetahui kadar kapur dan abu terbang optimum dalam stabilisasi tanah. Adapun pengujian yang dilakukan adalah:

- a. Pengujian batas-batas Atterberg
- b. Pengujian nilai CBR
- c. Pengujian Triaxial

8. Pengujian karbon dalam tanah sebelum dan setelah stabilisasi

Pengujian karbon dalam tanah setelah distabilisasi dilakukan untuk mengetahui kadar karbon dalam tanah yang hilang akibat stabilisasi. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat pendeteksi karbon sederhana yang dikembangkan oleh Prabowo dan Warnana (2024). Alat ini bekerja dengan implementasi IoT menggunakan ESP32 dan sensor MQ-135. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.2.

9. Analisis dan proses data

Data-data dari pengujian-pengujian yang dilakukan kemudian dikumpulkan diolah dan dianalisa. Penting untuk mengetahui apakah data yang dihasilkan sudah sesuai secara logis. Hal ini agar diketahui apakah pengujian yang dilakukan sudah sesuai dengan standar yang berlaku atau tidak.

10. Kesimpulan dan saran

Dari penelitian ini diharapkan dapat disimpulkan bagaimana perilaku karbon dalam tanah saat dilakukan stabilisasi dan potensi kerusakan lingkungan yang dapat ditimbulkan. Dari kesimpulan tersebut diharapkan dapat menghasilkan saran-saran agar tanah dapat difungsikan untuk mengatur siklus karbon secara global dengan metode-metode yang sudah ada.



Gambar 8 Alat pendeteksi karbon

### Luaran Penelitian

Melalui penelitian ini akan diperoleh:

1. Material stabilisasi dengan persentase campuran kapur dan abu terbang yang dapat memberikan nilai optimum saat digunakan untuk stabilisasi tanah yang distudi
2. Persentase material stabilisasi yang harus dicampurkan untuk stabilisasi agar diperoleh nilai parameter mekanik dan CBR yang paling optimum
3. Nilai kohesi, sudut geser dalam, dan CBR optimum serta plastistas dari tanah yang distabilisasi
4. Jumlah CO<sub>2</sub> yang keluar/terlepas dari tanah saat dilakukan stabilisasi menggunakan kapur dan abu terbang

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Sesuai uraian penjelasan pada Bab 3, penelitian ini dilakukan dengan melakukan pengujian parameter fisik dan mekanik tanah. Serangkaian pengujian ini dimulai pada tanah dengan kondisi

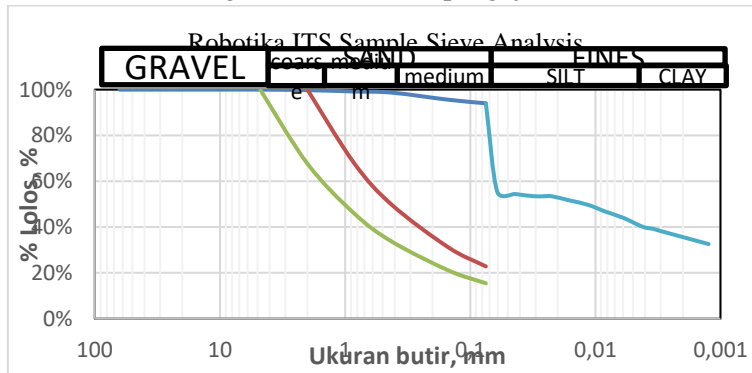


# Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

mula-mula terlebih dahulu untuk mengetahui klasifikasi tanah yang digunakan. Setelah itu, pengujian dilakukan pada tanah yang distabilisasi menggunakan kapur dengan variasi kadar 3%, 6%, dan 9% selama 7 hari untuk mengetahui kadar kapur optimumnya. Setelah mengetahui kadar kapur optimum maka dilakukan pengujian pada tanah yang distabilisasi menggunakan kapur dengan kadar optimum serta abu terbang kelas C dengan variasi kadar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% selama 7 hari untuk mengetahui kadar abu terbang optimumnya. Pengujian emisi CO<sub>2</sub> dilakukan pada tanah kondisi mula-mula, tanah terstabilisasi kapur dengan kadar optimum, dan tanah terstabilisasi kapur dan abu terbang dengan kadar optimum. Berikut adalah hasil dari serangkaian pengujian yang dilakukan.

## Karakteristik Tanah Mula-mula Tanpa Stabilisasi

Pengujian karakteristik fisik tanah mula-mula dilakukan untuk mengetahui klasifikasi dan kondisi mula-mula tanah sebelum dilakukan stabilisasi. Adapun pengujian yang dilakukan meliputi analisis granulometri, volumetri, dan gravimetri beserta pengujian batas-batas Atterberg.



Gambar 9 Grafik Distribusi Ukuran Butiran Tanah Sampel

Distribusi ukuran butiran dari tanah yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat dari Gambar 9 dimana sampel tanah ini mengandung 5,97% pasir, 42,46% lanau, dan 51,57% lempung. Selain itu, dari pengujian volumetri dan gravimetri diperoleh nilai berat jenis tanah sebesar 2,62.

Tabel 2 Hasil Pengujian Batas-Batas Atterberg Sampel Tanah Asli

| Uraian                  | Satuan  | 1       | 2      | 3       | PL     |
|-------------------------|---------|---------|--------|---------|--------|
| No Cawan                |         | 65      | 101    | 104     | 93     |
| B Cawan Kosong          | gr      | 47,271  | 35,274 | 39,317  | 46,132 |
| B. Cawan + Tanah Basah  | gr      | 60,055  | 46,036 | 55,771  | 74,910 |
| B. Cawan + Tanah Kering | gr      | 53,644  | 40,766 | 45,297  | 66,135 |
| B. Air                  | gr      | 6,411   | 5,270  | 10,474  | 8,775  |
| B. Tanah Kering         | gr      | 6,373   | 5,492  | 5,980   | 20,003 |
| Kadar Air (Wc) LL       | %       | 100,60% | 95,96% | 175,15% | 43,87% |
| Jml Pukulan             |         | 33      | 71     | 16      |        |
| LL                      | 142,00% |         |        |         |        |
| PL                      | 43,87%  |         |        |         |        |
| IP                      | 98,13%  |         |        |         |        |

Nilai batas cair, batas plastis, dan indeks plastisitas dapat dilihat pada Tabel 4.1. Dari Tabel 4.1 diketahui bahwa tanah pada penelitian ini untuk kondisi mula-mula memiliki nilai batas cair sebesar 142%, batas plastis sebesar 43,87%, dan indeks plastisitas sebesar 98,13%.

Setelah mendapatkan data-data karakteristik tanah di atas maka tanah dapat diklasifikasikan. Dikarenakan fokus dari penelitian ini adalah lebih kepada tanah sebagai material *subgrade* jalan, maka klasifikasi tanah yang digunakan adalah klasifikasi tanah menurut AASHTO (Tabel 4.2). Berdasarkan Tabel 4.2 maka tanah yang digunakan dalam penelitian ini dapat diklasifikasikan sebagai A-7-5.

Untuk mengetahui tingkat keandalan tanah, maka juga perlu dilakukan perhitungan nilai indeks grup (GI) dengan persamaan:

$$GI = (F_{200} - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F_{200} - 15)(PI - 10) \quad (4.1)$$

dengan:

F<sub>200</sub> = persentase butiran lolos saringan no.200

LL = batas cair

PI = indeks plastisitas

sehingga apabila dilakukan perhitungan akan didapatkan nilai GI sebesar 111,6. Dengan besaran nilai GI tersebut, maka tanah pada penelitian ini sangat buruk bagi perkerasan jalan.

Tabel 3 Tabel 4 Klasifikasi Tanah sebagai Material Subgrade menurut AASHTO

| General classification                              | Granular materials<br>(35% or less of total sample passing No. 200)    |              |              |                                                 |         |         |         |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|-------------------------------------------------|---------|---------|---------|
|                                                     | A-1                                                                    |              | A-3          | A-2                                             |         |         |         |
| Group classification                                | A-1-a                                                                  | A-1-b        | A-3          | A-2-4                                           | A-2-5   | A-2-6   | A-2-7   |
| Sieve analysis<br>(percentage passing)              |                                                                        |              |              |                                                 |         |         |         |
| No. 10                                              | 50 max.                                                                |              |              |                                                 |         |         |         |
| No. 40                                              | 30 max.                                                                | 50 max.      | 51 min.      |                                                 |         |         |         |
| No. 200                                             | 15 max.                                                                | 25 max.      | 10 max.      | 35 max.                                         | 35 max. | 35 max. | 35 max. |
| Characteristics of fraction<br>passing No. 40       |                                                                        |              |              |                                                 |         |         |         |
| Liquid limit                                        |                                                                        |              |              | 40 max.                                         | 41 min. | 40 max. | 41 min. |
| Plasticity index                                    |                                                                        | 6 max.       | NP           | 10 max.                                         | 10 max. | 11 min. | 11 min. |
| Usual types of significant<br>constituent materials | Stone fragments,<br>gravel, and sand                                   |              | Fine<br>sand | Silty or clayey gravel and sand                 |         |         |         |
| General subgrade rating                             | Excellent to good                                                      |              |              |                                                 |         |         |         |
| General classification                              | Silt-clay materials<br>(more than 35% of total sample passing No. 200) |              |              |                                                 |         |         |         |
| Group classification                                | A-4                                                                    | A-5          | A-6          | A-7<br>A-7-5 <sup>a</sup><br>A-7-6 <sup>b</sup> |         |         |         |
| Sieve analysis (percentage passing)                 |                                                                        |              |              |                                                 |         |         |         |
| No. 10                                              |                                                                        |              |              |                                                 |         |         |         |
| No. 40                                              |                                                                        |              |              |                                                 |         |         |         |
| No. 200                                             |                                                                        | 36 min.      | 36 min.      | 36 min.                                         |         |         |         |
| Characteristics of fraction passing No. 40          |                                                                        |              |              |                                                 |         |         |         |
| Liquid limit                                        |                                                                        | 40 max.      | 41 min.      | 40 max.                                         |         |         |         |
| Plasticity index                                    |                                                                        | 10 max.      | 10 max.      | 11 min.                                         |         |         |         |
| Usual types of significant constituent materials    |                                                                        | Silty soils  |              | Clayey soils                                    |         |         |         |
| General subgrade rating                             |                                                                        | Fair to poor |              |                                                 |         |         |         |

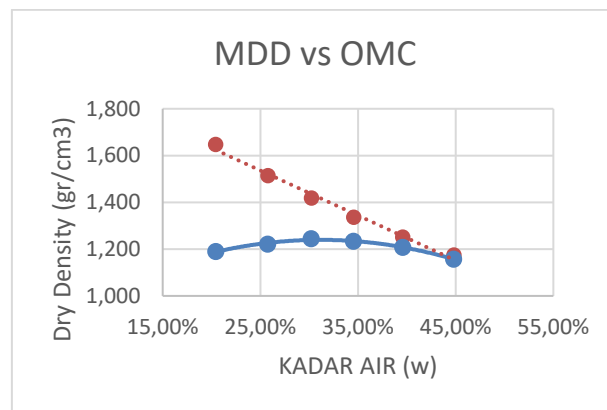
<sup>a</sup>For A-7-5,  $PI \leq LL - 30$

<sup>b</sup>For A-7-6,  $PI > LL - 30$

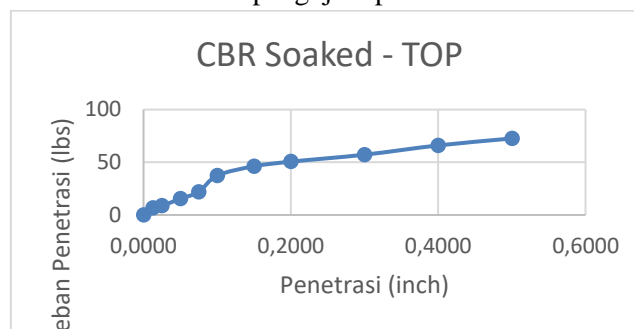
Salah satu parameter yang digunakan untuk mengetahui efek dari stabilisasi pada penelitian ini adalah nilai CBR dari tanah. Namun, sebelum melakukan pengujian CBR, nilai kepadatan kering maksimum dan kadar air optimum tanah harus diketahui melalui pengujian pemadatan menggunakan metode proctor standar. Grafik hasil pengujian pemadatan dapat dilihat pada Gambar 4.2. Dari pengujian pemadatan didapatkan nilai kepadatan kering maksimum tanah sebesar 1,245 gr/cm<sup>3</sup> dan kadar air optimum sebesar 30,22%.

Dari hasil pengujian pemadatan tersebut, maka data-data yang didapatkan akan digunakan sebagai dasar untuk merencanakan kondisi tanah untuk pengujian CBR. Pengujian CBR dilakukan dengan metode rendaman, dimana sampel yang sudah dipadatkan direndam selama 4 hari. Proses penekanan pada sampel dilakukan pada sisi atas dan sisi bawah dengan hasil pembacaan seperti pada Gambar 9 dan Gambar 10

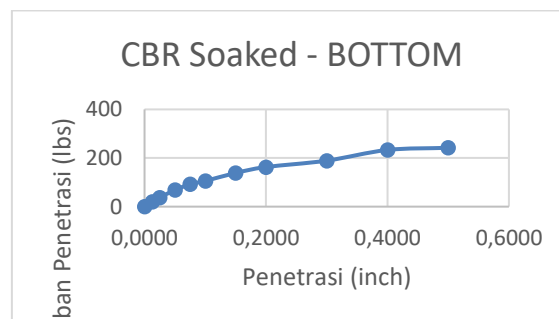
# Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah



Gambar 10 Grafik Hubungan antara Kepadatan Kering Maksimum dengan Kadar Air Optimum berdasarkan hasil pengujian pemadatan tanah asli



Gambar 11 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Atas pada Tanah Asli



Gambar 12 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Bawah pada Tanah Asli

Berdasarkan pengujian CBR maka didapatkan nilai CBR sebesar 1,25%. Berdasarkan nilai CBR ini maka tanah pada penelitian ini buruk sebagai urugan jalan.

## Karakteristik Tanah Terstabilisasi Kapur

Sesuai yang sudah dijelaskan pada bagian uraian tahap, sampel tanah yang digunakan akan distabilisasi menggunakan kapur dengan kadar 3%, 6%, dan 9% serta masa pemeraman selama 7 hari. Pada tanah yang distabilisasi kapur ini akan dilakukan pengujian volumetri-gravimetri untuk mengetahui Gs, batas-batas Atterberg, proctor, dan CBR guna mengetahui kadar kapur yang optimum untuk stabilisasi tanah tersebut. Kapur yang digunakan adalah kapur aktif (CaO). Kapur ini dipilih berdasarkan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa CaO memiliki efek yang lebih baik daripada CaCO<sub>3</sub>.

### *Spesific Gravity*

Pengujian pertama yang dilakukan pada tanah yang distabilisasi kapur adalah untuk mengetahui Specific Gravity. Adapun hasil dari pengujian ditampilkan pada Tabel 4.3. Dapat dilihat bahwa nilai Gs semakin kecil pada campuran kadar kapur yang semakin besar. Hal ini terjadi karena disebabkan oleh padatan butiran kapur yang lebih ringan daripada tanah itu sendiri, sehingga untuk volume yang sama, berat campuran tanah yang memiliki kadar kapur lebih banyak akan lebih ringan daripada campuran tanah yang memiliki kadar kapur lebih sedikit.

Tabel 5 Nilai Gs Tanah Terstabilisasi Kapur

| Jenis Sample   | Specific Gravity |
|----------------|------------------|
| Tanah + CaO 3% | 2,47             |
| Tanah + CaO 6% | 2,46             |
| Tanah + CaO 9% | 2,456            |

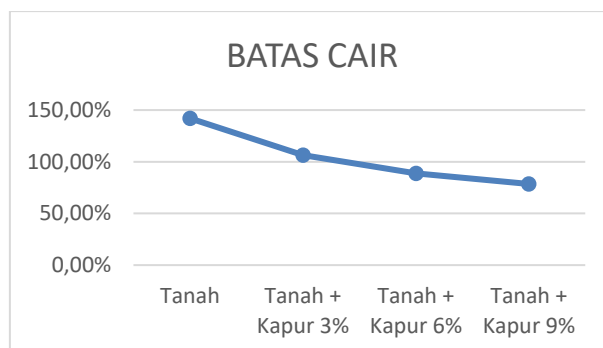
Batas Cair, Batas Plastis, dan Indeks Plastisitas

Pengujian batas-batas Atterberg merupakan hal dilakukan setelah specific gravity dari campuran tanah selesai dilakukan. Tujuan dilakukan pengujian ini adalah untuk mengetahui perilaku tanah ketika mengalami perubahan kadar air. Pengujian ini dilakukan pada tanah yang distabilisasi menggunakan kapur CaO dengan kadar 3%, 6%, dan 9%.

Pada campuran tanah terstabilisasi kapur CaO sebesar 3%, nilai batas cairnya sebesar 106,4% dan batas plastis sebesar 40,81% sehingga nilai indeks plastisitasnya sebesar 65,59%. Pada campuran tanah terstabilisasi kapur CaO sebesar 6%, nilai batas cairnya sebesar 88,7% dan batas plastis sebesar 43,81% sehingga nilai indeks plastisitasnya sebesar 45,36%. Pada campuran tanah terstabilisasi kapur CaO sebesar 9%, nilai batas cairnya sebesar 78,5% dan batas plastis sebesar 49,18% sehingga nilai indeks plastisitasnya sebesar 29,32%. Rekapitulasi hasil pengujian untuk ketiga campuran tanah tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 6 Rekapitulasi Hasil Pengujian Batas-batas Atterberg untuk tanah asli dan variasi campuran tanah dengan kapur

| CAMPURAN         | LL      | PL     | IP     |
|------------------|---------|--------|--------|
| Tanah            | 142,00% | 43,87% | 98,13% |
| Tanah + Kapur 3% | 106,40% | 40,81% | 65,59% |
| Tanah + Kapur 6% | 88,70%  | 43,34% | 45,36% |
| Tanah + Kapur 9% | 78,50%  | 49,18% | 29,32% |



Gambar 11 Grafik Hubungan antara Nilai Batas Cair Terhadap Penambahan Kapur pada Tanah Asli

Perilaku perubahan nilai batas cair pada tanah akibat penambahan kapur dapat dilihat pada Gambar 11 Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai batas cair menurun seiring dengan penambahan kadar kapur pada tanah. Berikutnya perilaku perubahan nilai batas plastis pada tanah

## Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

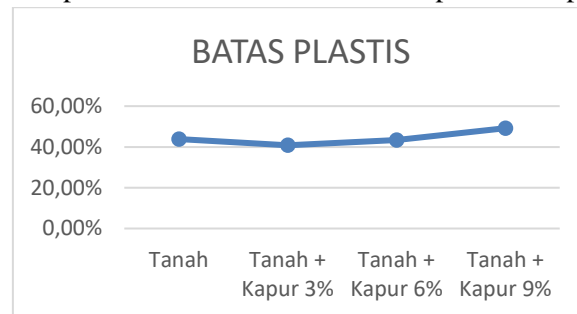
akibat penambahan kapur dapat dilihat pada Gambar 4.6. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai batas plastis sempit mengalami penurunan saat ditambahkan kapur sebanyak 3%. Namun, seiring dengan pertambahan kapur, maka nilai batas plastisnya terus meningkat.

Dari nilai batas cari dan batas plastis, maka dapat diketahui nilai Indeks Plastisitas. Perilaku perubahan nilai indeks plastisitas akibat penambahan kapur pada tanah dapat dilihat pada Gambar 4.7. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa besaran kadar penambahan kapur berbanding lurus dengan besaran penurunan nilai indeks plastisitas pada tanah yang digunakan pada penelitian ini.

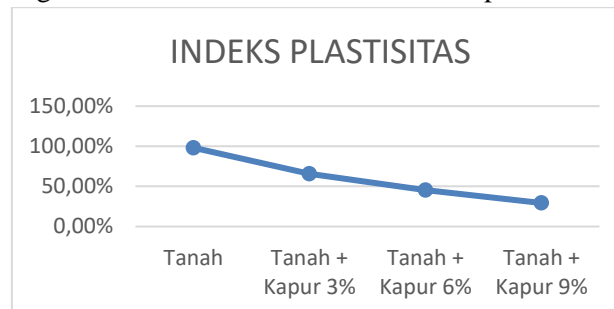
Nilai indeks plastisitas erat hubungannya dengan nilai aktivitas tanah. Aktivitas tanah merupakan sebuah indeks yang ditemukan oleh Skempton (1953) untuk mengetahui potensi ekspansi dari tanah (Das, 2010). Adapun aktivitas tanah dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$A = \frac{\text{Indeks Plastisitas}}{\% \text{ butiran lebih halus dari } 2 \mu\text{m}} \quad (4.2)$$

dimana A adalah aktivitas tanah. Sehingga berdasarkan persamaan 4.2, disimpulkan bahwa untuk tanah yang sama, nilai indeks plastisitas berbanding lurus dengan nilai aktivitas tanah. Oleh karena itu, juga dapat disimpulkan bahwa penambahan kapur pada tanah dalam penelitian ini menurunkan nilai aktivitasnya, sehingga potensi ekspansi tanah juga menurun. Secara umum dapat dikatakan bahwa penambahan kapur sudah memperbaiki kualitas tanah dari sisi potensi ekspansinya.



Gambar 12 Grafik Hubungan antara Nilai Batas Plastis Terhadap Penamban Kapur pada Tanah Asli



Gambar 13 Grafik Hubungan antara Nilai Indeks Plastisitas Terhadap Penambahan Kapur pada Tanah Asli

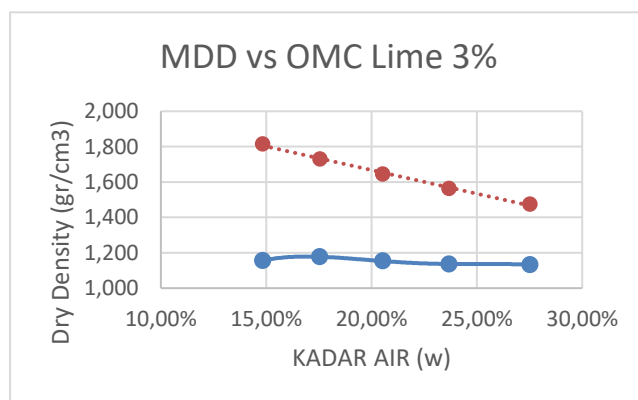
### Proctor dan CBR Tanah Terstabilisasi Kapur

Pengujian CBR dilakukan pada tanah yang sudah distabilisasi menggunakan kapur. Tujuan dilakukan pengujian ini adalah untuk menjadi salah satu parameter dalam penentuan kadar kapur optimum yang nanti akan digunakan dalam stabilisasi tanah, kapur, dan abu terbang. Namun, dalam pengujian CBR perlu diketahui kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum suatu material sehingga dilakukanlan pengujian pemadatan.

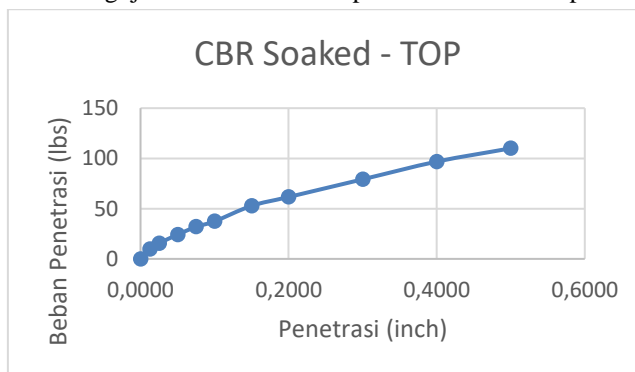
Pengujian pemadatan dilakukan menggunakan proctor standar. Pengujian ini dilakukan pada ketiga variasi campuran untuk mengetahui kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum ketiga variasi campuran sampel tanah, yaitu variasi kadar kapur 3%, 6%, dan 9%.

Adapun nilai dari kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari campuran tanah dan kapur 3% dapat dilihat pada Gambar 13 Pada variasi tanah dan kapur sebesar 3% diperoleh nilai kepadatan kering maksimum sebesar 1,177 gr/cm<sup>3</sup> dan kadar air optimum sebesar 17,55%. Nilai-nilai inilah yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan sampel untuk pengujian CBR.

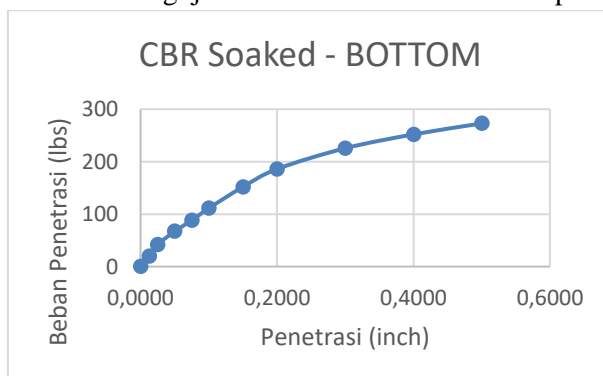
Pengujian CBR dilakukan penekanan pada sisi atas dan bawah dari sampel yang sudah direndam selama 4 hari. Adapun hasil dari pengujian penekanan dapat dilihat dari Gambar 4.9 dan 4.10. Dari hasil pengujian CBR maka didapatkan nilai CBR desain untuk campuran tanah dan kapur 3% sebesar 2,75%.



Gambar 15 Grafik Hubungan antara Kepadatan Kering Maksimum dengan Kadar Air Optimum Berdasarkan Hasil Pengujian Pematatan Campuran Tanah dan Kapur 3%



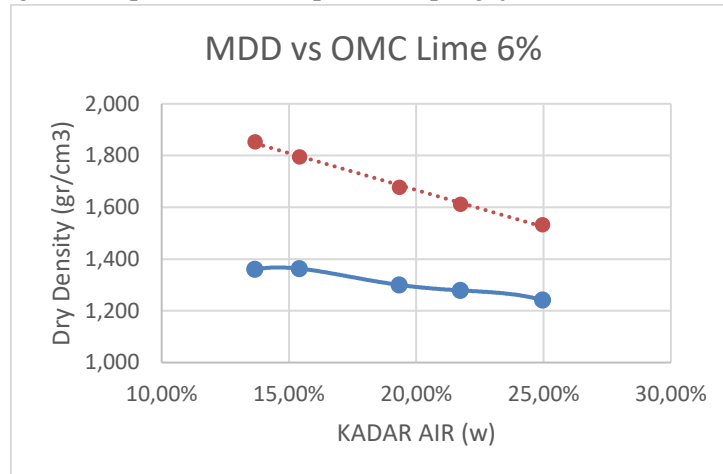
Gambar 16 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Atas pada Tanah dan Kapur 3%



Gambar 17 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Bawah pada Tanah dan Kapur 3%

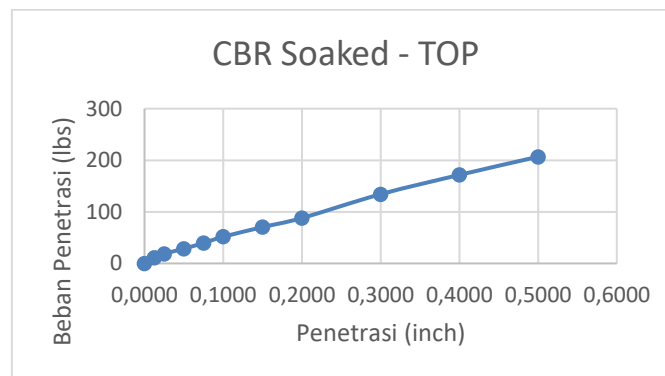
## Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

Berikutnya dilakukan pengujian proctor dan CBR pada variasi tanah dan kapur sebesar 6%. Adapun nilai dari kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari campuran tanah dan kapur 6% dapat dilihat pada Gambar 18 Pada variasi tanah dan kapur sebesar 6% diperoleh nilai kepadatan kering maksimum sebesar 1,363 gr/cm<sup>3</sup> dan kadar air optimum sebesar 15,41%. Nilai-nilai inilah yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan sampel untuk pengujian CBR.

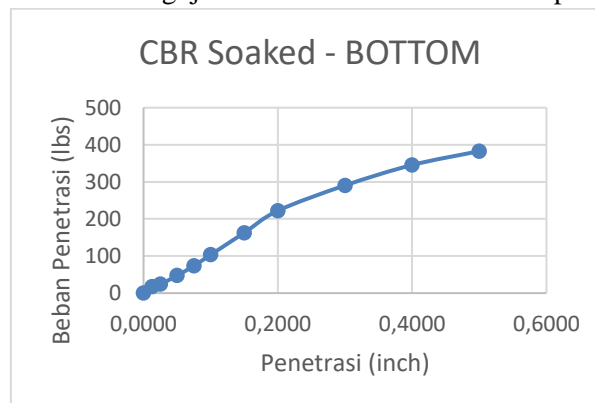


Gambar 18 Grafik Hubungan antara Kepadatan Kering Maksimum dengan Kadar Air Optimum Berdasarkan Hasil Pengujian Pemadatan Campuran Tanah dan Kapur 6%

Pengujian CBR dilakukan penekanan pada sisi atas dan bawah dari sampel yang sudah direndam selama 4 hari. Adapun hasil dari pengujian penekanan dapat dilihat dari Gambar 4.11 dan 4.12. Dari hasil pengujian CBR maka didapatkan nilai CBR desain untuk campuran tanah dan kapur 6% sebesar 4,19%.

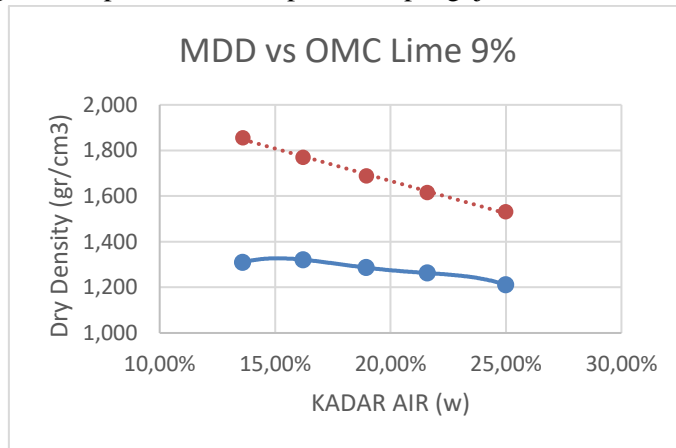


Gambar 19 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Atas pada Tanah dan Kapur 6%



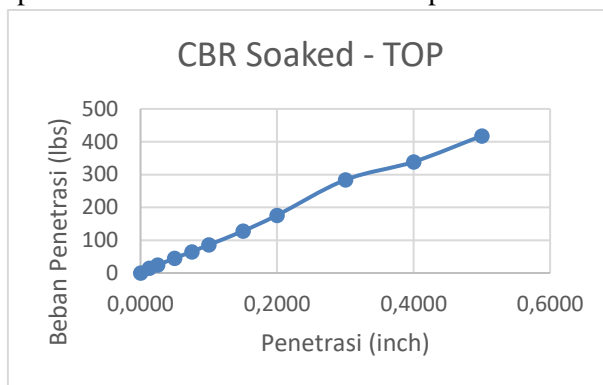
Gambar 20 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Bawah pada Tanah dan Kapur 6%

Berikutnya dilakukan pengujian proctor dan CBR pada variasi tanah dan kapur sebesar 9%. Adapun nilai dari kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari campuran tanah dan kapur 9% dapat dilihat pada Gambar 21 Pada variasi tanah dan kapur sebesar 9% diperoleh nilai kepadatan kering maksimum sebesar 1,321 gr/cm<sup>3</sup> dan kadar air optimum sebesar 16,21%. Nilai-nilai inilah yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan sampel untuk pengujian CBR.

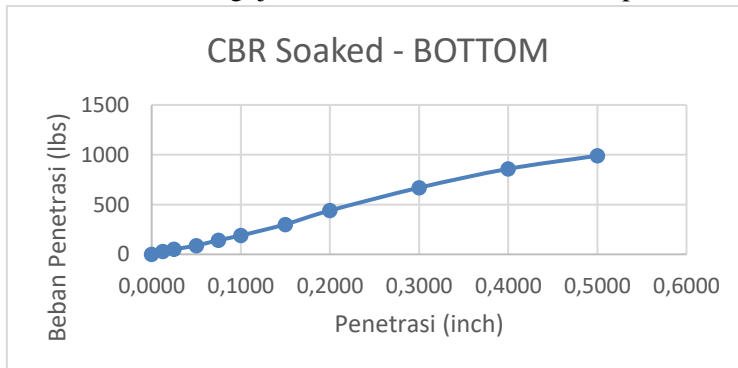


Gambar 22 Grafik Hubungan antara Kepadatan Kering Maksimum dengan Kadar Air Optimum Berdasarkan Hasil Pengujian Pemadatan Campuran Tanah dan Kapur 9%

Pengujian CBR dilakukan penekanan pada sisi atas dan bawah dari sampel yang sudah direndam selama 4 hari. Adapun hasil dari pengujian penekanan dapat dilihat dari Gambar 23 dan 24 Dari hasil pengujian CBR maka didapatkan nilai CBR desain untuk campuran tanah dan kapur 9% sebesar 8,04%.



Gambar 23 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Atas pada Tanah dan Kapur 9%



Gambar 24 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Bawah pada Tanah dan Kapur 9%

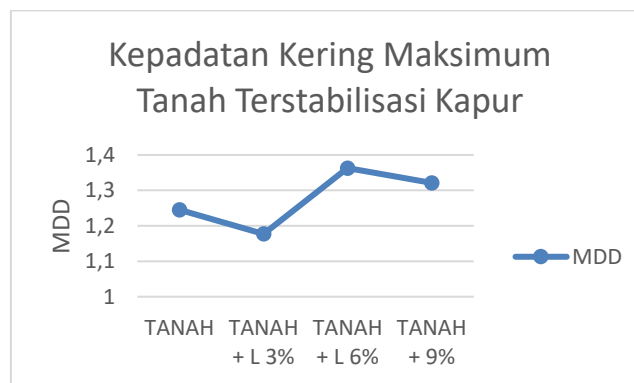


## Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

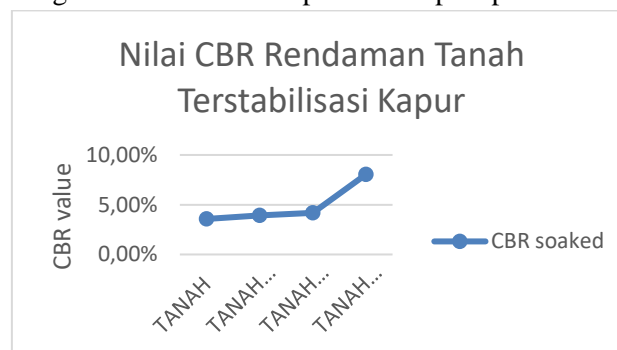
Dari serangkaian hasil pengujian di atas, maka rekapitulasi data nilai OMC, MDD, dan CBR dapat dilihat pada Tabel 7 Apabila ditinjau dari hasil pengujian CBR dan proctor terdapat hal yang sedikit janggal. Dari Gambar 24 Dapat dilihat bahwa variasi tanah dan kapur 6% memiliki kepadatan kering maksimum yang lebih besar daripada variasi tanah dan kapur 9%. Namun, Gambar 4.18 menunjukkan bahwa nilai CBR desain dari variasi tanah dan kapur 9% lebih besar dibandingkan variasi tanah dan kapur 9%.

Tabel 7 Rekapitulasi Nilai Proctor dan CBR Tanah Terstabilisasi Kapur

| NO. | SAMPLE          | MDD   | OMC    | NILAI CBR |
|-----|-----------------|-------|--------|-----------|
| 1   | TANAH ASLI      | 1,245 | 30,22% | 3,57%     |
| 2   | TANAH + LIME 3% | 1,177 | 17,55% | 3,92%     |
| 3   | TANAH + LIME 6% | 1,363 | 15,41% | 4,19%     |
| 4   | TANAH + LIME 9% | 1,321 | 16,21% | 8,04%     |

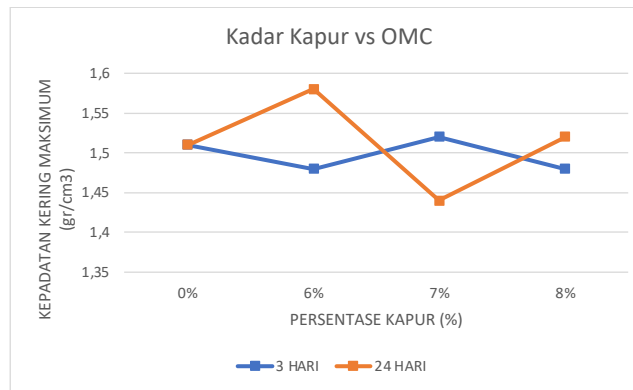


Gambar 25 Grafik Hubungan Antara Kadar Kapur terhadap Kepadatan Kering Maksimum Tanah

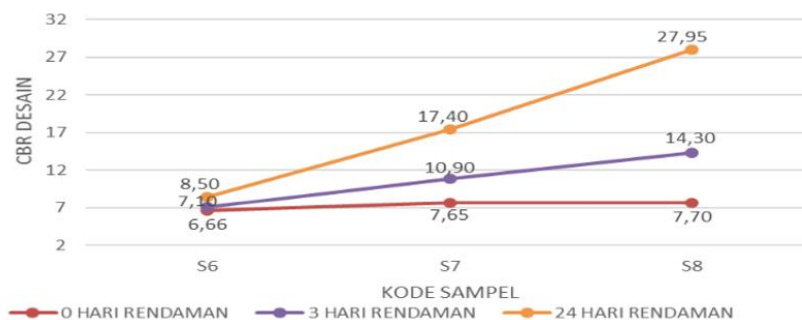


Gambar 26 Grafik Hubungan Antara Kadar Penambahan Kapur dengan Nilai CBR

Data dengan perilaku serupa juga diperoleh pada penelitian oleh Aryanto, dkk pada tahun 2021. Pada Gambar 26 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan MDD dari variasi kapur 0% ke 6%, lalu MDD mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar kapur. Walaupun perilaku kepadatan kering maksimum menunjukkan hasil demikian, namun nilai CBR desain terus meningkat seiring bertambahnya kadar kapur (Gambar 26).



Gambar 27 Grafik Hubungan Antara Kadar Penambahan Kapur dengan Kepadatan Kering Maksimum (Sumber: Aryanto, dkk., 2021)



Gambar 28 Grafik Hubungan Antara Kadar Penambahan Kapur dengan Nilai CBR (Sumber: Aryanto, dkk., 2021)

Hal ini dapat dijelaskan oleh indeks plastistas (IP) dari variasi tanah dan kapur 9% yang jauh lebih rendah sehingga potensi ekspansinya juga jauh lebih kecil. Perlu diingat bahwa pengujian CBR yang dilakukan adalah dengan perendaman sehingga tanah yang semula kering pasti akan mengembang apabila potensi ekspansinya tinggi. Hal inilah yang mengakibatkan adanya kejanggalan tersebut.

Maka dari itu, dengan meninjau hasil CBR desain, dapat disimpulkan bahwa kadar kapur optimum untuk tanah lempung Robotika ITS adalah sebesar 9%. Oleh karena itu, pengujian variasi tanah, kapur, dan abu terbang akan menggunakan kadar kapur sebesar 9%.

### Karakteristik Tanah Terstabilisasi Kapur dan Abu Terbang

Pada bagian sebelumnya telah disimpulkan bahwa kadar kapur optimum untuk stabilisasi tanah yang ditinjau pada penelitian ini adalah sebesar 9%. Oleh karena itu, penelitian ini dilanjutkan dengan mencari tahu kadar optimum abu terbang untuk stabilisasi tanah yang sama. Pada serangkaian pengujian ini, tanah distabilisasi dengan kadar kapur optimum, yaitu 9%, dan variasi kadar abu terbang sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Dikarenakan tujuan utama dari serangkaian pengujian ini adalah hanya untuk mengetahui kadar abu terbang optimum, maka pengujian yang dilakukan adalah specific gravity, proctor, dan CBR.

#### Specific Gravity

Pengujian pertama yang dilakukan pada tanah yang distabilisasi kapur adalah untuk mengetahui Specific Gravity. Adapun hasil dari pengujian ditampilkan pada Tabel 4.6

Tabel 7 Nilai Gs Tanah Terstabilisasi Kapur dan Abu Terbang

| Jenis Tanah | Gs |
|-------------|----|
|-------------|----|

Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

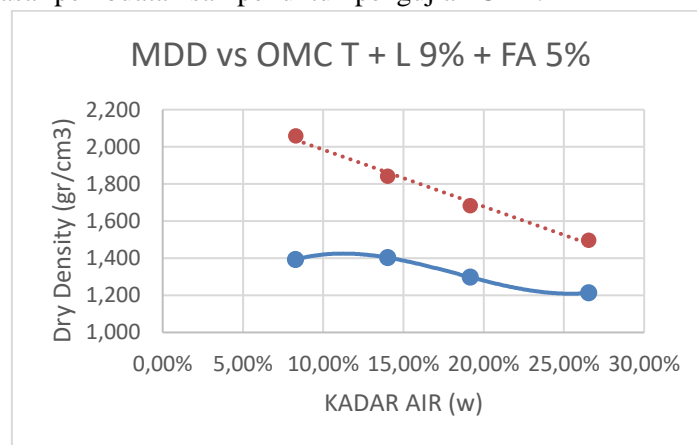
|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Tanah + CaO 9% + Abu Terbang 5%  | 2,42 |
| Tanah + CaO 9% + Abu Terbang 10% | 2,38 |
| Tanah + CaO 9% + Abu Terbang 15% | 2,32 |
| Tanah + CaO 9% + Abu Terbang 20% | 2,29 |
| Tanah + CaO 9% + Abu Terbang 25% | 2,23 |

Proctor dan CBR Tanah Terstabilisasi Kapur dan Abu Terbang

Pengujian CBR dilakukan pada tanah yang sudah distabilisasi menggunakan kapur dan abu terbang. Kadar kapur yang digunakan adalah sebesar 9%, sesuai dengan nilai kadar kapur optimum pada pengujian CBR pada tanah yang terstabilisasi kapur sebelumnya. Untuk kadar abu terbang yang diuji adalah sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kadar campuran kapur dan abu terbang optimum untuk stabilisasi tanah lempung yang berasal dari Gedung Robotika ITS ini.

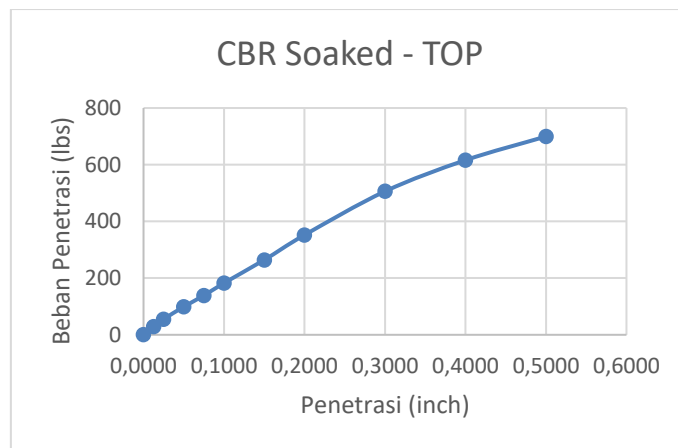
Dalam pengujian CBR dibutuhkan data kepadatan kering maksimum dan kadar air optimum pada tiap-tiap sampel sebagai dasar kadar air dalam pembuatan sampel CBR. Maka dari itu, dilakukanlah pengujian pemadatan dengan proctor standar untuk tiap-tiap sampel. Berikut adalah hasil dari pengujian proctor dan CBR untuk tiap-tiap sampel.

Adapun nilai dari kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari campuran tanah, kapur 9% dan abu terbang 5% dapat dilihat pada Gambar 29 Pada variasi ini diperoleh nilai kepadatan kering maksimum sebesar 1,403 gr/cm<sup>3</sup> dan kadar air optimum sebesar 14,03%. Nilai-nilai inilah yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan sampel untuk pengujian CBR.

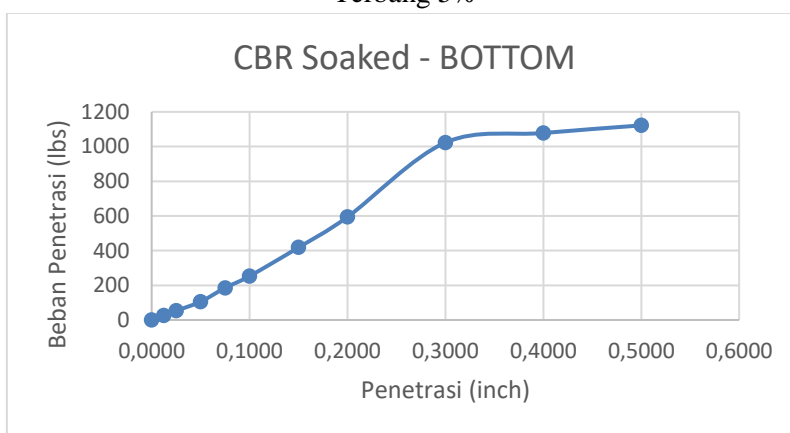


Gambar 29 Grafik Hubungan antara Kepadatan Kering Maksimum dengan Kadar Air Optimum Berdasarkan Hasil Pengujian Pemadatan Campuran Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 5%

Pengujian CBR dilakukan penekanan pada sisi atas dan bawah dari sampel yang sudah direndam selama 4 hari. Adapun hasil dari pengujian penekanan dapat dilihat dari Gambar 4.22 dan 4.23. Dari hasil pengujian CBR maka didapatkan nilai CBR desain untuk campuran tanah, kapur 9%, dan abu terbang 5% adalah sebesar 10,82%.

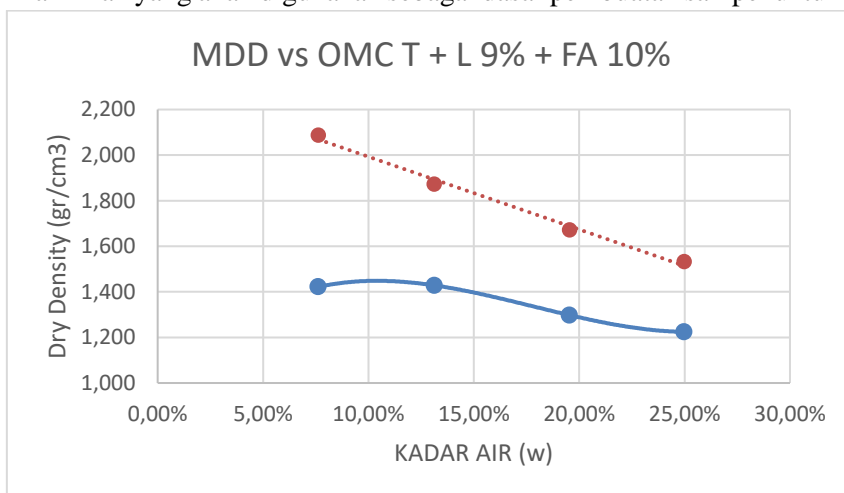


Gambar 30 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Atas pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 5%



Gambar 31 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Bawah pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 5%

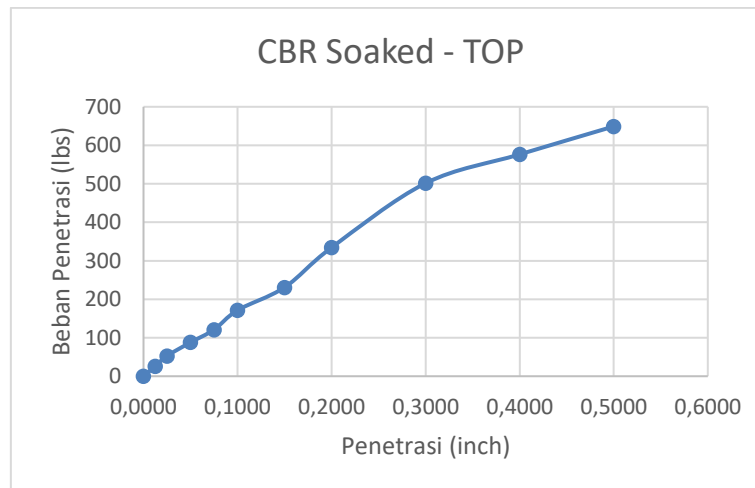
Berikutnya dilakukan pengujian proctor dan CBR pada variasi tanah dan kapur sebesar 9% dan abu terbang sebesar 10%. Adapun nilai dari kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari campuran tanah, kapur 9% dan abu terbang 10% dapat dilihat pada Gambar 4.24. Pada variasi ini diperoleh nilai kepadatan kering maksimum sebesar 1,429 gr/cm<sup>3</sup> dan kadar air optimum sebesar 13,12%. Nilai-nilai inilah yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan sampel untuk pengujian CBR.



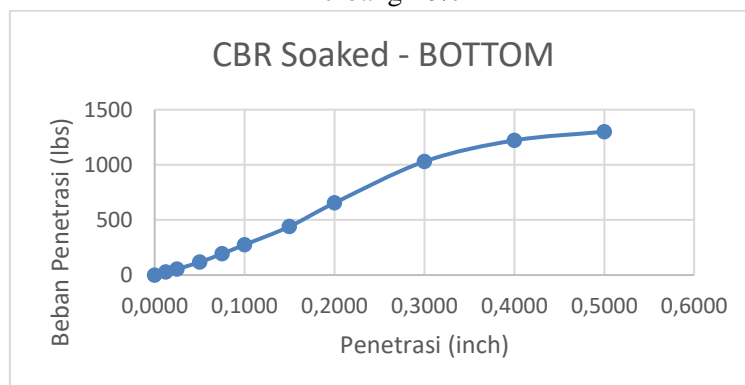
Gambar 32 Grafik Hubungan antara Kepadatan Kering Maksimum dengan Kadar Air Optimum Berdasarkan Hasil Pengujian Pemadatan Campuran Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 10%

## Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

Pengujian CBR dilakukan penekanan pada sisi atas dan bawah dari sampel yang sudah direndam selama 4 hari. Adapun hasil dari pengujian penekanan dapat dilihat dari Gambar 4.25 dan 4.26. Dari hasil pengujian CBR maka didapatkan nilai CBR desain untuk campuran tanah, kapur 9%, dan abu terbang 10% adalah sebesar 11,84%.

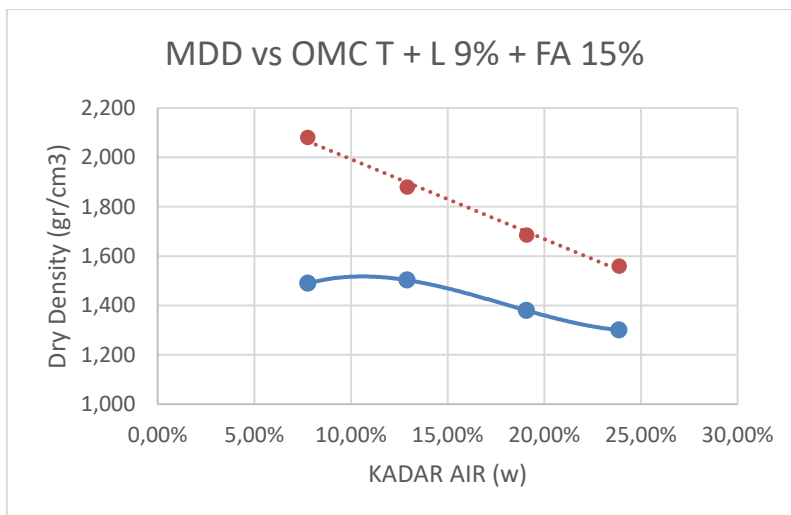


Gambar 33 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Atas pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 10%



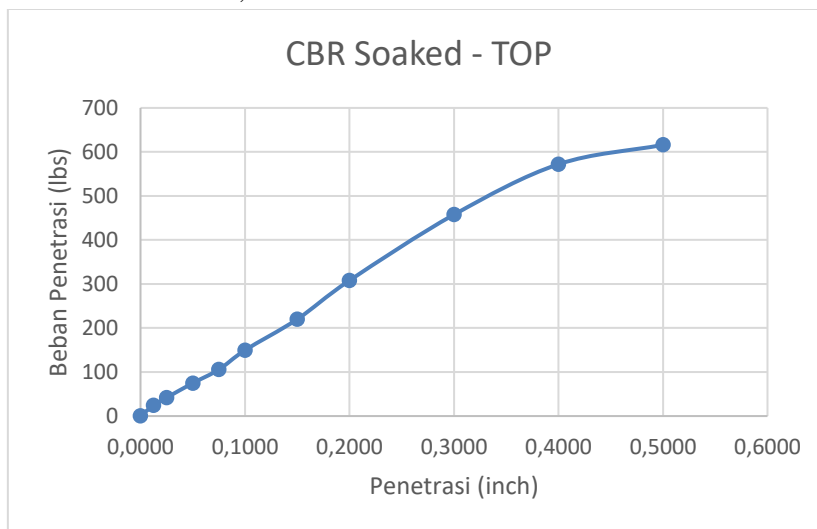
Gambar 34 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Bawah pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 10%

Berikutnya dilakukan pengujian proctor dan CBR pada variasi tanah dan kapur sebesar 9% dan abu terbang sebesar 15%. Adapun nilai dari kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari campuran tanah, kapur 9% dan abu terbang 15% dapat dilihat pada Gambar 4.27. Pada variasi ini diperoleh nilai kepadatan kering maksimum sebesar  $1,502 \text{ gr/cm}^3$  dan kadar air optimum sebesar 12,91%. Nilai-nilai inilah yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan sampel untuk pengujian CBR.

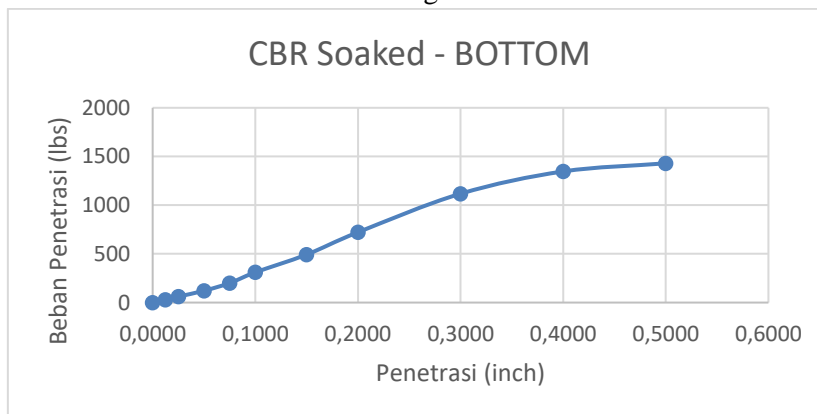


Gambar 35 Grafik Hubungan antara Kepadatan Kering Maksimum dengan Kadar Air Optimum Berdasarkan Hasil Pengujian Pemadatan Campuran Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 15%

Pengujian CBR dilakukan penekanan pada sisi atas dan bawah dari sampel yang sudah direndam selama 4 hari. Adapun hasil dari pengujian penekanan dapat dilihat dari Gambar 35 dan 36. Dari hasil pengujian CBR maka didapatkan nilai CBR desain untuk campuran tanah, kapur 9%, dan abu terbang 15% adalah sebesar 13,19%.



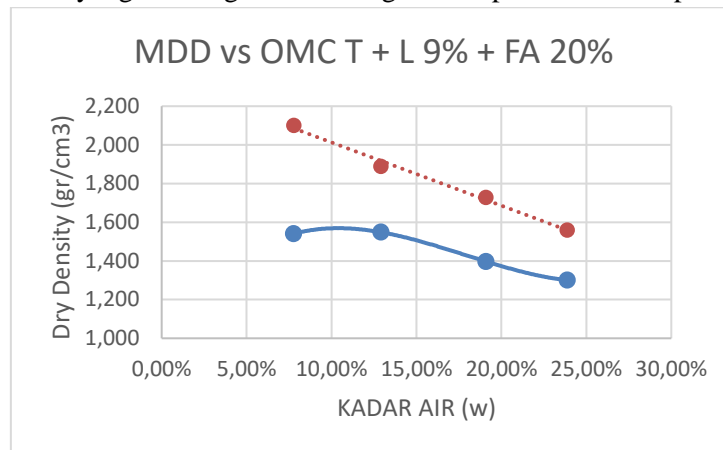
Gambar 36 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Atas pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 15%



## Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

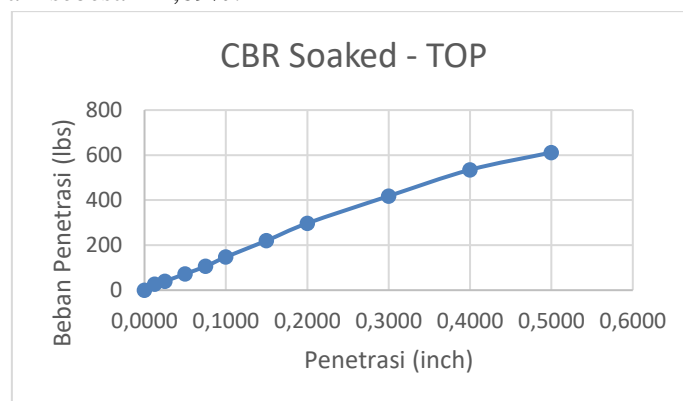
Gambar 37 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Bawah pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 15%

Berikutnya dilakukan pengujian proctor dan CBR pada variasi tanah dan kapur sebesar 9% dan abu terbang sebesar 20%. Adapun nilai dari kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari campuran tanah, kapur 9% dan abu terbang 20% dapat dilihat pada Gambar 4.30. Pada variasi ini diperoleh nilai kepadatan kering maksimum sebesar  $1,548 \text{ gr/cm}^3$  dan kadar air optimum sebesar 12,68%. Nilai-nilai inilah yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan sampel untuk pengujian CBR.

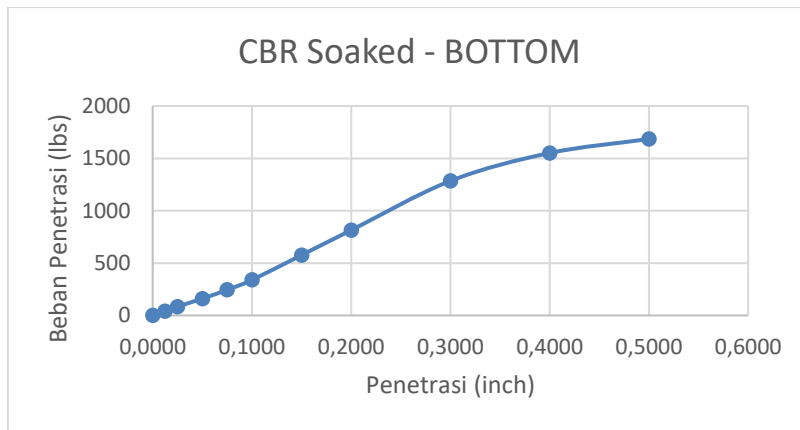


Gambar 38 Grafik Hubungan antara Kepadatan Kering Maksimum dengan Kadar Air Optimum Berdasarkan Hasil Pengujian Pemadatan Campuran Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 20%

Pengujian CBR dilakukan penekanan pada sisi atas dan bawah dari sampel yang sudah direndam selama 4 hari. Adapun hasil dari pengujian penekanan dapat dilihat dari Gambar 38 dan 39. Dari hasil pengujian CBR maka didapatkan nilai CBR desain untuk campuran tanah, kapur 9%, dan abu terbang 20% adalah sebesar 14,69%.

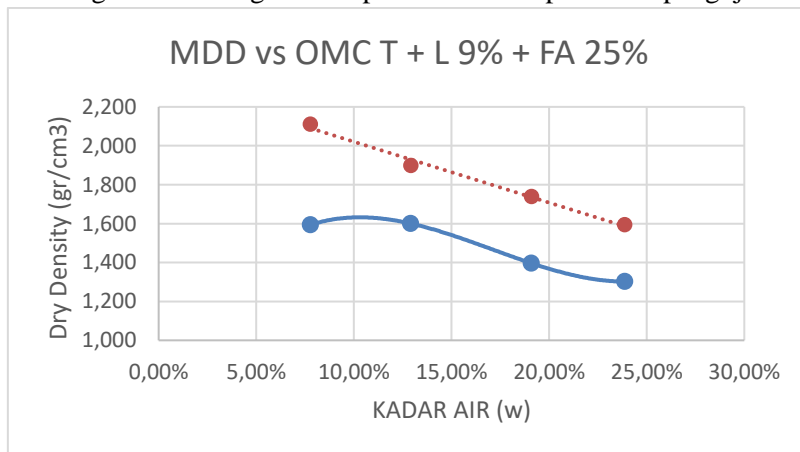


Gambar 38 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Atas pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 20%



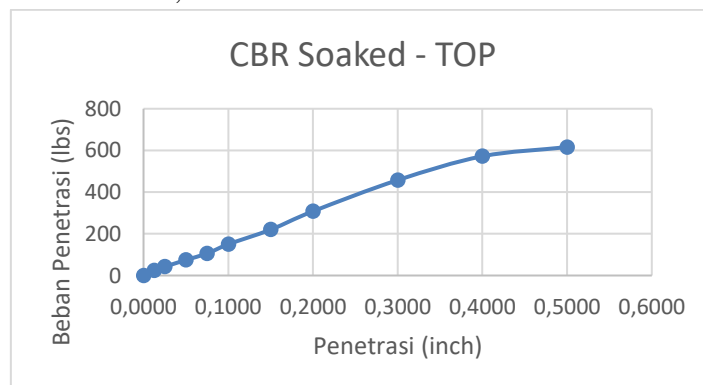
Gambar 39 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Bawah pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 20%

Berikutnya dilakukan pengujian proctor dan CBR pada variasi tanah dan kapur sebesar 9% dan abu terbang sebesar 25%. Adapun nilai dari kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari campuran tanah, kapur 9% dan abu terbang 25% dapat dilihat pada Gambar 40 Pada variasi ini diperoleh nilai kepadatan kering maksimum sebesar 1,600 gr/cm<sup>3</sup> dan kadar air optimum sebesar 12,37%. Nilai-nilai inilah yang akan digunakan sebagai dasar pembuatan sampel untuk pengujian CBR.



Gambar 00 Grafik Hubungan antara Kepadatan Kering Maksimum dengan Kadar Air Optimum Berdasarkan Hasil Pengujian Pemadatan Campuran Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 25%

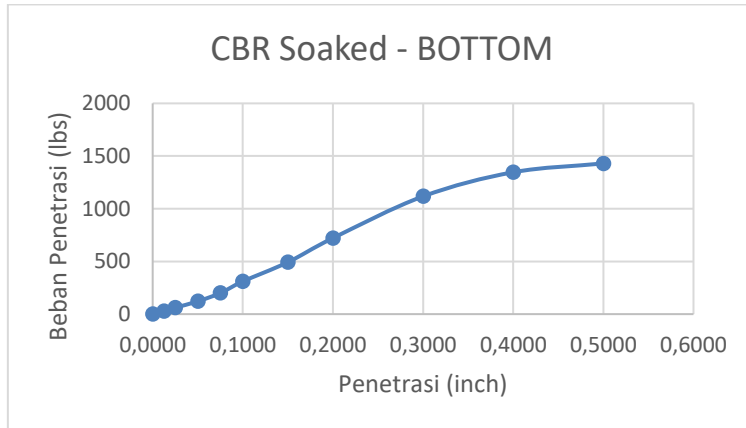
Pengujian CBR dilakukan penekanan pada sisi atas dan bawah dari sampel yang sudah direndam selama 4 hari. Adapun hasil dari pengujian penekanan dapat dilihat dari Gambar 41 dan 42 Dari hasil pengujian CBR maka didapatkan nilai CBR desain untuk campuran tanah, kapur 9%, dan abu terbang 25% adalah sebesar 16,79%





Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

Gambar 01 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Atas pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 25%

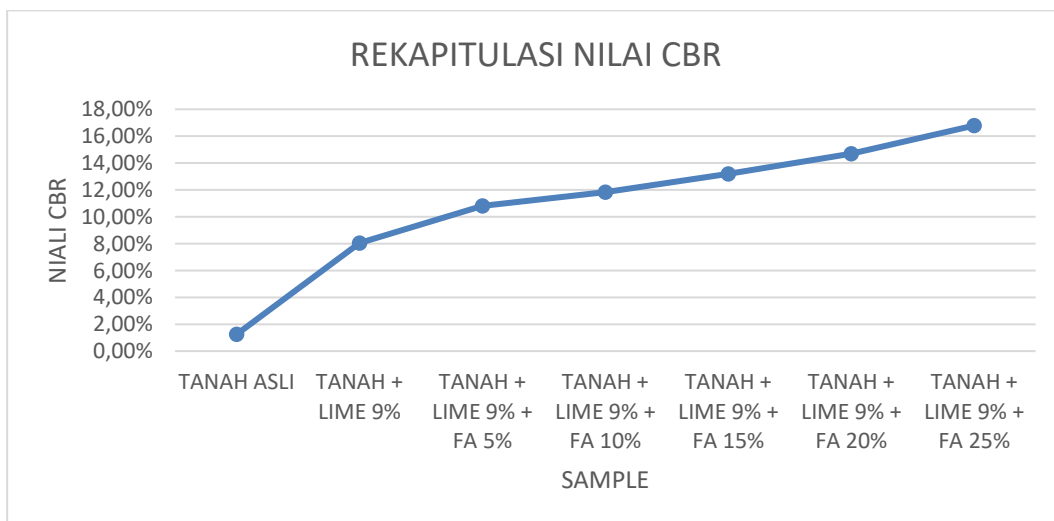


Gambar 02 Grafik Pembacaan Pengujian CBR Rendaman Sisi Bawah pada Tanah, Kapur 9%, dan Abu Terbang 25%

Adapun rekapitulasi nilai CBR design untuk semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.7. Tren perilaku perubahan nilai CBR terhadap perubahan kadar abu terbang dapat dilihat pada Gambar 4.36. Adapun rekapitulasi nilai CBR design untuk semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.7. Tren perilaku perubahan nilai CBR terhadap perubahan kadar abu terbang dapat dilihat pada Gambar 4.36.

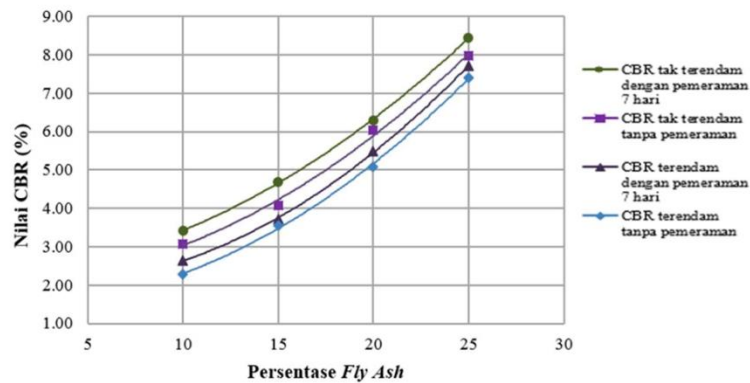
Tabel 8 Rekapitulasi Hasil Pengujian CBR untuk

| NO. | SAMPLE                   | NILAI CBR |
|-----|--------------------------|-----------|
| 1   | TANAH ASLI               | 1,25%     |
| 2   | TANAH + LIME 9%          | 8,04%     |
| 3   | TANAH + LIME 9% + FA 5%  | 10,82%    |
| 4   | TANAH + LIME 9% + FA 10% | 11,84%    |
| 5   | TANAH + LIME 9% + FA 15% | 13,19%    |
| 6   | TANAH + LIME 9% + FA 20% | 14,69%    |
| 7   | TANAH + LIME 9% + FA 25% | 16,79%    |



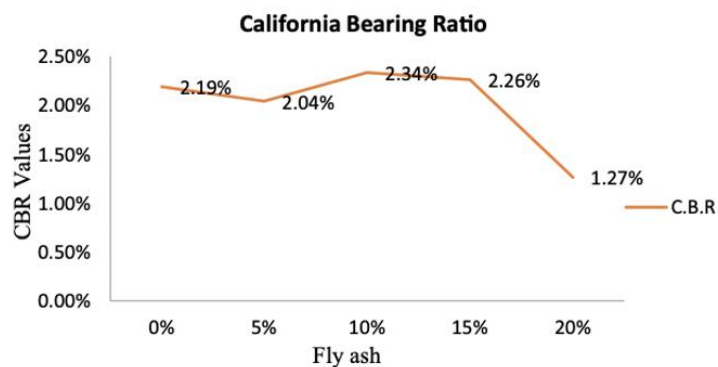
Gambar 43 Grafik Hubungan antara Nilai CBR dengan Penambahan Kadar Abu Terbang pada Tanah Sampel

Perilaku perubahan nilai CBR pada pengujian ini serupa dengan penelitian-penelitian sebelumnya dimana nilai CBR meningkat seiring dengan meningkatnya kadar abu terbang yang ditambahkan. Penelitian oleh Hangge, dkk. pada tahun 2021 juga menghasilkan kesimpulan serupa. Pada penelitian ini lempung dengan klasifikasi A-7-6 menurut system klasifikasi AASHTO distabilisasi menggunakan kapur 5% dan variasi kadar abu terbang 5%, 10%, 15%, 20%, 25%. Hasil pengujian CBR yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4.38. Pada Gambar 4.38 dapat dilihat bahwa nilai CBR tanah terus meningkat seiring meningkatnya kadar abu terbang yang diberikan pada metode uji apapun.



Gambar 44 Grafik Hubungan Antara Kadar Abu Terbang dengan Nilai CBR (Sumber: Hangge, dkk., 2021)

Alasan penggunaan variasi kadar abu terbang dari 5%-25% adalah berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya (Buhler & Cerato, 2007; Sharma & Sivapullaiah, 2016; Kumar & Harika, 2020). Pada penelitian oleh Kumar & Harika nilai CBR sudah turun pada penambahan abu terbang sebanyak 20% (Gambar 45). Buhler & Cerato (2007) juga menggunakan variasi abu terbang maksimum sebanyak 20%.



Gambar 05 Hubungan Antara Kadar Penambahan Abu Terbang dengan Nilai CBR (Sumber: Kumar & Harika, 2020)

Pada Gambar 4.36 dapat dilihat bahwa nilai CBR pada tanah yang diuji mengalami kenaikan seiring dengan penambahan kadar abu terbang. Dari serangkaian hasil pengujian CBR ini dapat disimpulkan bahwa campuran optimum untuk stabilisasi tanah Gedung Robotika ITS kali ini adalah kapur sebanyak 9% dan abu terbang sebanyak 25%. Oleh karena itu, kadar bahan aditif ini yang akan digunakan untuk meninjau emisi karbon pada tanah saat dilakukan stabilisasi.

### Karakteristik Fisik dan Mekanik Tanah Tanpa Stabilisasi, Terstabilisasi Kapur, dan Abu Terbang pada Kadar Optimum

## Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

Dari serangkaian pengujian sebelumnya telah disimpulkan kadar kapur, maupun kadar kapur dan abu terbang yang optimum sebagai bahan stabilisasi dari tanah lempung yang berasal dari Gedung Robotika ITS yang digunakan pada penelitian kali ini. Secara berturut-turut, kadar kapur dan abu terbangnya adalah 9% dan 25%. Guna mengetahui efek dari stabilisasi tanah dan dengan melihat hasil pengujian sebelumnya, maka perlu dilakukan pengujian batas-batas Atterberg untuk tanah terstabilisasi kapur 9% dan abu terbang 25% beserta pengujian triaxial untuk mengetahui perubahan sudut geser dalam dan kohesi dari tanah setelah distabilisasi. Adapun data-data parameter fisik maupun mekanik tanah dapat dilihat pada Tabel 9

Tabel 9 Rekapitulasi Parameter Fisik dan Mekanik Tanah Asli dan Terstabilisasi

| Parameter Tanah                        | T Asil | T + L9% | T + L9% + FA 25% |
|----------------------------------------|--------|---------|------------------|
| Gs                                     | 2,62   | 2,456   | 2,236            |
| LL                                     | 142%   | 78,50%  | 58%              |
| PL                                     | 43,87% | 49,18%  | 49,55%           |
| IP                                     | 98,13% | 29,32%  | 8,45%            |
| $\gamma$ dry max (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1,245  | 1,320   | 1,600            |
| OMC                                    | 30,22% | 16,21%  | 12,37%           |
| CBR                                    | 3,57%  | 8,04%   | 16,79%           |
| Cu (gr/cm <sup>2</sup> )               | 0,12   | 0,22    | 0,31             |
| $\theta$ (degree)                      | 4,2    | 6       | 2,6              |

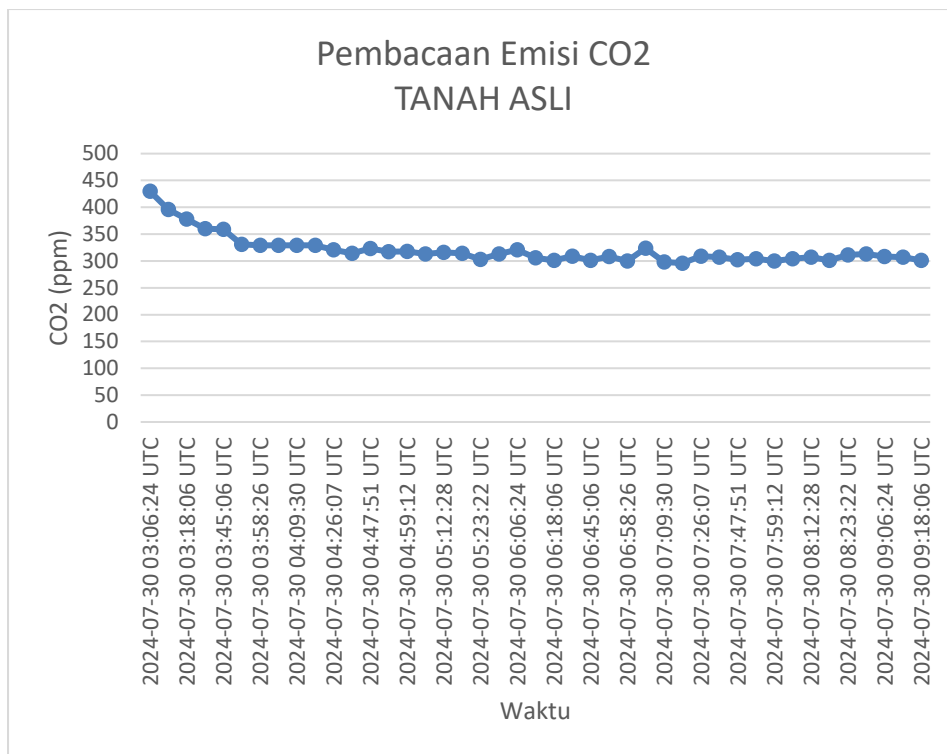
Dapat dilihat dari hasil serangkaian pengujian di laboratorium, kualitas kekuatan tanah dapat disimpulkan meningkat seiring dengan dilakukannya stabilisasi. Dari segi kepadatan kering maksimum, nilai CBR, indeks plastisitas maupun kohesi tanah semuanya menunjukkan tanda-tanda bahwa tanah mengalami perbaikan.

### Pengujian Emisi Karbon saat Proses Stabilisasi

Pengujian emisi karbon dilakukan menggunakan alat pendeteksi CO<sub>2</sub> yang dikembangkan oleh mahasiswa S1 Departemen Teknik Geofisika ITS. Alat ini bekerja dengan implementasi IOT menggunakan ESP32 dan sensor MQ-135. Pengujian dilakukan pada tiga sampel tanah, yaitu tanah asli, tanah terstabilisasi kapur dengan kadar optimum, dan tanah terstabilisasi kapur dan abu terbang dengan kadar optimum. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui dan membandingkan emisi CO<sub>2</sub> pada tanah dengan ketiga kondisi tersebut.

#### Pengujian Emisi Karbon pada Tanah Asli

Pengujian emisi karbon dilakukan pada tanah asli bertujuan untuk mendapatkan parameter untuk dibandingkan dengan emisi karbon pada saat tanah distabilisasi. Adapun hasil pembacaan emisi CO<sub>2</sub> selama kurang lebih enam jam dapat dilihat pada Gambar 4.39. Pada pengujian ini pembacaan emisi CO<sub>2</sub> cukup stabil berkisar pada 300 ppm.



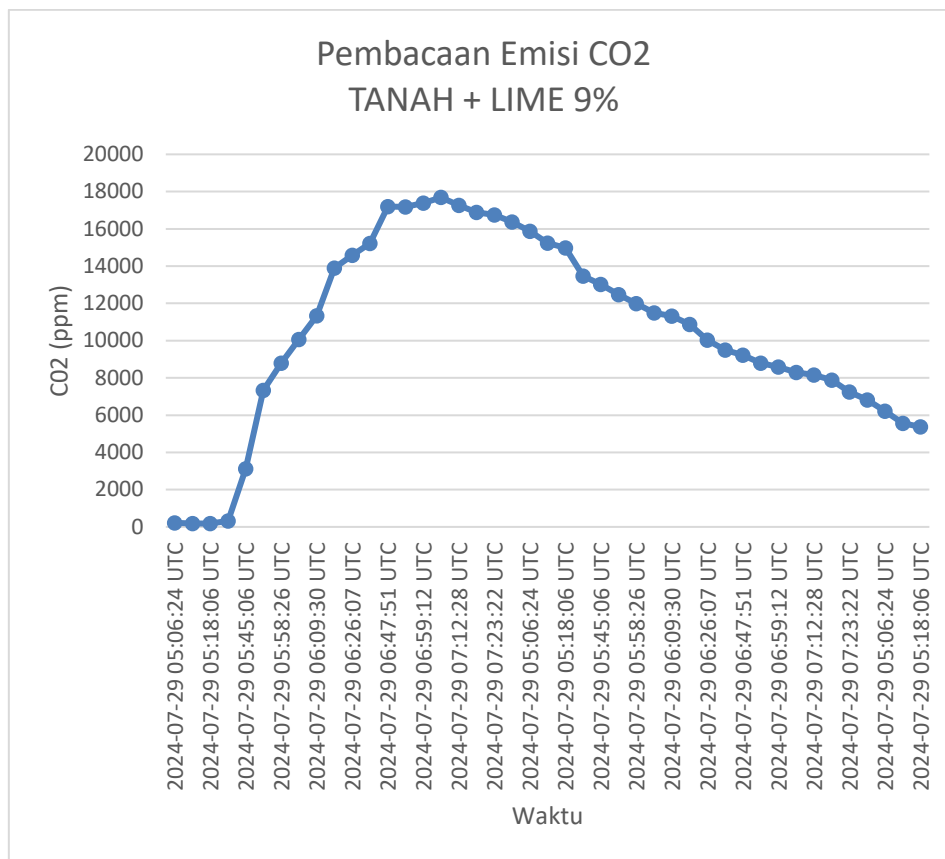
Gambar 46 Grafik emisi CO2 pada tanah asli tanpa bahan stabilisator

#### Pengujian Emisi Karbon pada Tanah dan Kapur 9%

Pengujian emisi karbon dilakukan pada tanah yang distabilisasi dengan kapur. Kadar kapur yang digunakan sebanyak 9% dari berat kering tanah. Kadar kapur ini dipilih berdasarkan kadar kapur optimum yang sudah diuji pada pengujian sebelumnya. Adapun hasil pembacaan emisi CO<sub>2</sub> dapat dilihat pada Gambar 46.

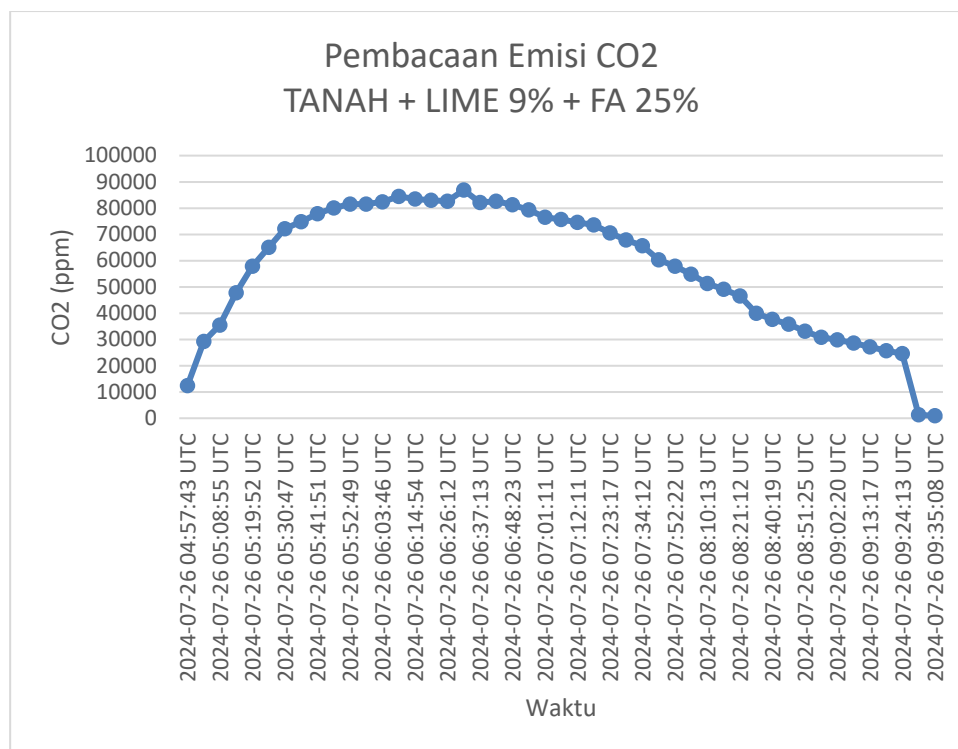
Pada Gambar 47 dapat dilihat terjadi kenaikan emisi karbon yang sangat signifikan pada akuarium. Pembacaan emisi karbon tertinggi adalah 17.667 ppm pada saat kurang lebih 2 jam setelah stabilisasi. Setelah mencapai emisi tertingginya, jumlah CO<sub>2</sub> dalam akuarium berangsur menurun secara perlahan.

## Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah



Gambar 48 Grafik Emisi CO2 pada Tanah yang Distabilisasi Kapur 9%

Pengujian Kadar Karbon pada Tanah yang Distabilisasi Karbon 9% dan Abu Terbang 25%  
Pengujian kadar karbon dilakukan pada tanah yang distabilisasi dengan kapur dan abu terbang. Kadar kapur yang digunakan adalah 9% dan kadar abu terbang yang digunakan adalah 25%. Jumlah bahan stabilisator yang digunakan ditentukan berdasarkan kadar kapur dan abu terbang optimum yang diperoleh dari pengujian yang telah dilakukan sebelumnya. Adapun hasil pembacaan emisi CO<sub>2</sub> pada pengujian ini dapat dilihat dari Gambar 49.



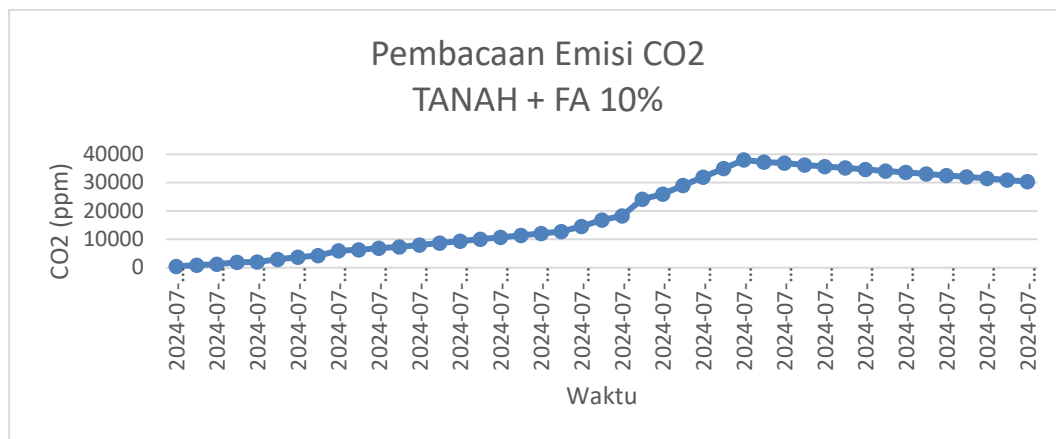
Gambar 50 Grafik Emisi CO2 pada Tanah yang Distabilisasi Kapur 9% dan Abu Terbang 25%

Pada Gambar 4.35 dapat dilihat terjadi kenaikan emisi karbon yang sangat signifikan pada sampel. Pembacaan emisi karbon tertinggi adalah 86.853 ppm pada saat 1,5 jam setelah stabilisasi dilakukan. Setelah mencapai emisi tertingginya, jumlah CO<sub>2</sub> dalam akuarium pengujian berangsur menurun secara perlahan.

Dari ketiga pengujian emisi karbon yang dilakukan, maka dapat diketahui emisi karbon tertinggi untuk tanah asli, tanah terstabilisasi kapur, dan tanah terstabilisasi kapur dan abu terbang secara berturut-turut adalah 490 ppm, 17.667 ppm, dan 86.853 ppm. Dari hasil pengujian ini sudah dapat disimpulkan bahwa terjadi suatu reaksi antara tanah dengan kapur dan tanah dengan kapur dan abu terbang.

Menurut Tugaswati pada tahun 2008, tingkat emisi CO<sub>2</sub> dapat dikategorikan menjadi 3, yaitu aman, berbahaya, dan mematikan. Kategori emisi CO<sub>2</sub> yang aman adalah ketika emisi CO<sub>2</sub> kurang dari 5.000 ppm. Kategori emisi CO<sub>2</sub> yang berbahaya adalah ketika emisi CO<sub>2</sub> 5.000 – 40.000 ppm. Kategori emisi CO<sub>2</sub> yang mematikan adalah ketika emisi CO<sub>2</sub> lebih dari 40.000 ppm. Berdasarkan syarat yang ada maka apabila tanah yang diuji distabilisasi menggunakan campuran optimum, maka emisi yang terjadi akan masuk ke dalam kategori berbahaya. Oleh karena itu, dicari varias campuran zat aditif yang menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> yang lebih baik namun tetap memenuhi syarat sebagai lapisan *subgrade* jalan. Setelah dilakukan pengujian kembali, maka didapatkan hasil dari pengujian emisi dari stabilisasi tanah menggunakan campuran kapur 5% dan abu terbang 10%. Adapun hasil pengujian emisi CO<sub>2</sub> dari campuran ini dapat dilihat pada Gambar 4.42. Hasil emisi tertinggi dari campuran ini adalah sebesar 38.013 ppm, yang mana menurut Tugaswati masuk ke dalam kategori berbahaya.

Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah



Gambar 51 Grafik Emisi CO2 pada Tanah yang Distabilisasi Kapur 9% dan Abu Terbang 10%

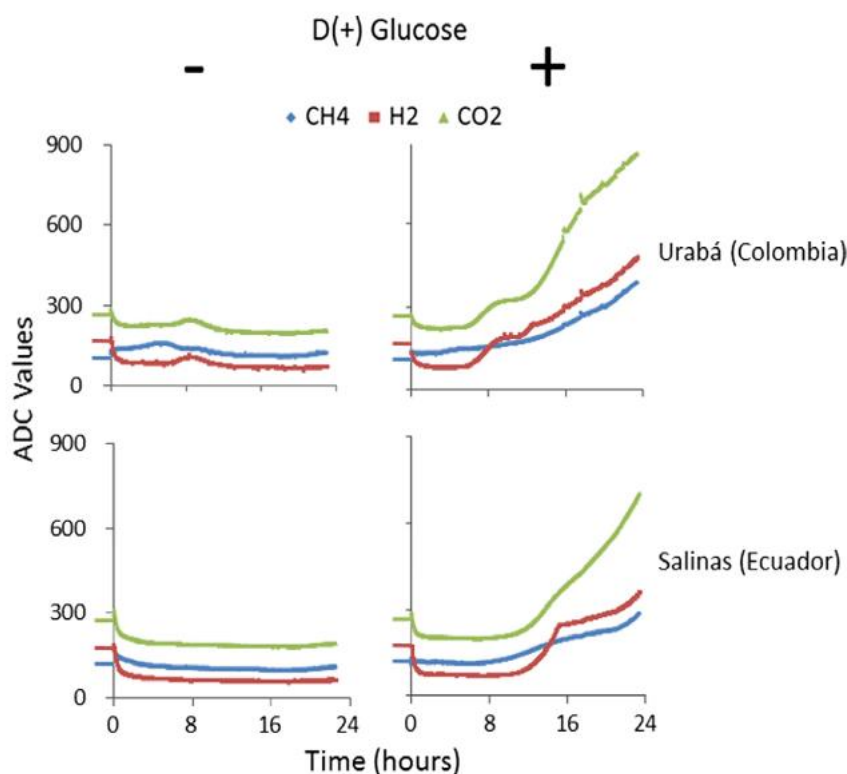
Setelah didapatkan variasi campuran dengan emisi CO<sub>2</sub> yang masih dapat ditoleransi, maka campuran ini diuji parameter fisik dan mekaniknya. Adapun hasil pengujian parameter fisik dan mekanik untuk campuran tanah, kapur 9% dan abu terbang 10% dapat dilihat pada Tabel 4.9. Dengan parameter tanah tersebut dan merujuk pada syarat timbunan menurut *Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan* oleh Kementerian PUPR yang tertulis pada subbab 2.7 maka tanah yang terstabilisasi dengan campuran ini dapat digunakan sebagai bahan timbunan lapisan *subgrade* jalan.

Tabel 10 Parameter Tanah Terstabilisasi Kapur 9% dan Abu Terbang 10%

| Parameter Tanah                        | T + L9% + FA 10% |
|----------------------------------------|------------------|
| Gs                                     | 2,382            |
| LL                                     | 60,00%           |
| PL                                     | 49,15%           |
| IP                                     | 10,85%           |
| $\gamma$ dry max (gr/cm <sup>3</sup> ) | 1,429            |
| OMC                                    | 13,12%           |
| CBR                                    | 11,84%           |
| Cu (gr/cm <sup>2</sup> )               | 0,24             |
| $\theta$ (degree)                      | 4,2              |

Alat pendeteksi karbon sederhana ini merupakan alat yang baru dikembangkan, sehingga belum ada pengujian lain yang menggunakan alat ini selain penelitian ini dan penelitian oleh Prabowo (2024). Namun, alat ini dikembangkan berdasarkan model alat yang dikembangkan oleh Pineda dan Perez pada tahun 2017. Jenis sensor yang digunakan sama yaitu MQ-135, hanya saja perbedaan antara alat oleh Prabowo dengan alat oleh Pineda dan Perez ada pada komponen proses datanya. Alat oleh Prabowo menggunakan ESP32 sebagai komponen proses data sehingga data bisa langsung dibaca dengan bantuan program pada website ThinkSpeak sedangkan alat oleh Pineda dan Perez menggunakan PIC16F886 micro controller sebagai komponen proses datanya untuk nantinya dihubungkan dengan program MicroPlottery. Adapun alat oleh Pineda dan Perez digunakan untuk menguji emisi gas sampel

tanah dari Kolombia. Hasil pengujian pembacaan emisi gas CO<sub>2</sub> oleh Pineda dan Perez dapat dilihat pada Gambar 51.



Gambar 51 Emisi gas dari tanah saat kondisi tanpa dan dengan ditambahkan glukosa (Sumber: Pineda & Perez, 2017)

## KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai kepadatan optimum untuk tanah yang distabilisasi dengan kapur sebesar 3%, 6%, dan 9% secara berurutan adalah 1,177 gr/cm<sup>3</sup>, 1,363 gr/cm<sup>3</sup>, 1,321 gr/cm<sup>3</sup>. Selanjutnya kepadatan kering optimum tanah yang distabilisasi dengan kapur sebesar 9% dan abu terbang dengan variasi kadar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% secara berurutan adalah 1,403 gr/cm<sup>3</sup>, 1,429 gr/cm<sup>3</sup>, 1,502 gr/cm<sup>3</sup>, 1,548 gr/cm<sup>3</sup>, dan 1,600 gr/cm<sup>3</sup>
2. Nilai kepadatan optimum untuk tanah yang distabilisasi dengan kapur sebesar 3%, 6%, dan 9% secara berurutan adalah 3,92%, 4,19%, dan 8,04%. Selanjutnya nilai CBR tanah yang distabilisasi dengan kapur sebesar 9% dan abu terbang dengan variasi kadar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% secara berurutan adalah 10,82%, 11,84%, 13,19%, 14,69%, 16,79%.
3. Nilai indeks plastisitas untuk tanah yang distabilisasi dengan kapur sebesar 3%, 6%, dan 9% adalah sebesar 65,59%, 45,36%, 29,32%. Selanjutnya nilai indeks plastisitas tanah yang distabilisasi dengan kapur sebesar 9% dan abu terbang dengan variasi kadar 10% dan 25% secara berurutan adalah 10,85% dan 8,45%.
4. Berdasarkan hasil serangkaian yang telah dilakukan, kadar zat aditif yang paling efektif dalam stabilisasi tanah yang digunakan adalah kapur sebesar 9% dan abu terbang sebesar 25%. Namun, dari hasil pengujian emisi karbon diketahui bahwa campuran tersebut menyebabkan emisi karbon dengan level mematikan, sehingga sebaiknya digunakan campuran kapur sebesar 9% dan abu terbang sebesar 25%.
5. Nilai kohesi tanah setelah distabilisasi kapur 9% saja dan kapur 9% ditambah abu terbang 25% secara berurutan adalah 0,22 gr/cm<sup>2</sup> dan 0,31 gr/cm<sup>2</sup>. Selanjutnya, nilai sudut geser dalam tanah



# Pengaruh Stabilisasi Tanah Menggunakan Abu Terbang Dan Kapur Terhadap Perubahan Karakteristik Fisik, Mekanik, dan Nilai CBR Serta Kadar Karbon dalam Tanah

setelah distabilisasi kapur 9% saja dan kapur 9% ditambah abu terbang 25% secara berurutan adalah 6° dan 2,6°.

6. Jumlah karbon yang teremisikan dari tanah saat dilakukan stabilisasi menggunakan campuran kapur 9%, kapur 9% ditambah abu terbang 10%, dan kapur 9% ditambah abu terbang 25% secara berurutan adalah 17.667 ppm, 38.013 ppm, dan 86.853 ppm..

## DAFTAR PUSTAKA

- Alfriansya, Rahmad, Julian Randisyah, Evelyn Anabela Anisa, and Pinta Astuti. 2021. Studi Pemanfaatan Prekursor Fly Ash Lokal pada Self Compacting Geopolymer Concrete (SCGC). **Semesta Teknika**.
- Barman, Dharmendra, and Sujit Kumar Dash. 2022. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. Kharagapur: **CSRME**.
- Chang, Ilhan, Minhyeong Lee, and Gye-Chun Cho. 2019. "Global CO2 Emission-Related Geotechnical Engineering Hazards and the Mission for Sustainable Geotechnical Engineering." **Energies: MDPI**.
- Edil, Tuncer B., Hector A. Acosta, and Craig H. Benson. 2006. "Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash." **Journal of Materials in Civil Engineering**.
- Fernandez-Jimenez, Ana, and Angel Palomo. 2003. "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements." **Fuel Vol. 82 2259-2265**.
- Forsythe, Perry, and Grace K. C. Ding. 2014. "Greenhouse Gas Emissions from Excavation on Residential Construction Sites." **Australasian Journal of Construction Economics and Building 1-10**.
- Mir, B. A., and A. Sridharan. 2013. "Physical and Compaction Behaviour of Clay Soil–Fly Ash Mixtures." **Geotech Geol Eng 1059-1072**.
- Murray, Haydn H. 2007. Applied Clay Mineralogy. Amsterdam: **Elsevier**.
- Reyes, Arleen, and Miguel Pando. 2007. Evaluation of CFBC fly ash for Improvement of Soft Clays. Northern Kentucky: **World of Coal Ash**.
- Rossi, Lorenzo M. W., Alexia Stokes, and Giacomo Russo. 2019. "EMBANKMENTS AS A CARBON SINK: A study on carbon sequestration strategies in organic topsoil and mineral subsoil." **TERRE**.
- Scharlemann, Jorn P. W., Valerie Kapos, and Edmund Tanner. 2014. "Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool." **Carbon Management**.
- Shvarzman, A, K Kovler, I Schamban, and G. S. Grader. 2002. Influence of Chemical and Phase Composition of Mineral Admixtures on Their Pozzolanic Activity. **ICE**.
- Yilmaz, Yuksel, Haluk Sinan Coban, Bora Cetin, and Tuncer B. Edil. 2015. Use of Standard and Off-Spec Fly Ashes for Soil Stabilization. **ASCE**.



© 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)