

PERBAIKAN ANGKA CALIFORNIA BEARING RATIO PADA TANAH LANAU DENGAN CAMPURAN LIMBAH ALUMINIUM & KACA

Raykie Grandi^{1*} dan Alfred Jonathan Susilo¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
*Raykie.325210025@stu.untar.ac.id

Masuk: 22-12-2025, revisi: 04-01-2026, diterima untuk diterbitkan: 08-01-2026

ABSTRACT

This study aims to evaluate the improvement of the California Bearing Ratio (CBR) value of silt soil using aluminum and glass waste mixtures. In highway engineering, a higher CBR value indicates better soil bearing capacity. The soil sample was taken from the Pantai Indah Kapuk 2 area in Tangerang, Banten, and tested at the Soil Mechanics Laboratory of Tarumanagara University. Waste mixtures were tested at 4%, 8%, and 12% concentrations for both aluminum and glass. The results show that glass waste mixtures yield more significant increases in California Bearing Ratio values compared to aluminum waste. The highest California Bearing Ratio value with glass was achieved at 12% concentration, with a 6.61% increase, whereas the aluminum mixture reached its peak at 8% with a 4.42% increase. A decrease at 12% aluminum suggests that excessive material does not necessarily improve bearing capacity. These findings suggest that glass waste is more effective in enhancing the mechanical properties of subgrade soils compared to aluminum waste. Furthermore, this supports sustainable development principles by utilizing industrial waste in civil engineering applications.

Keywords: California Bearing Ratio; subgrade; aluminum waste; glass waste; soil stabilization

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan nilai California Bearing Ratio (CBR) pada tanah lanau menggunakan campuran limbah aluminium dan kaca. Dalam konteks rekayasa jalan raya, nilai California Bearing Ratio yang tinggi mencerminkan daya dukung tanah yang baik. Tanah yang digunakan berasal dari wilayah Pantai Indah Kapuk 2, Tangerang, Banten, dan diuji di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Tarumanagara. Variasi campuran limbah yang diuji adalah 4%, 8%, dan 12% untuk masing-masing jenis limbah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran limbah kaca memberikan peningkatan nilai California Bearing Ratio yang lebih signifikan dibandingkan limbah aluminium. Nilai California Bearing Ratio tertinggi pada campuran kaca tercapai pada 12% dengan peningkatan sebesar 6,61%, sedangkan pada limbah aluminium peningkatan tertinggi terjadi pada 8% sebesar 4,42%. Penurunan nilai California Bearing Ratio pada campuran aluminium 12% mengindikasikan bahwa kelebihan bahan tidak selalu meningkatkan daya dukung tanah. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah kaca lebih efektif dalam meningkatkan sifat mekanis tanah dasar dibandingkan dengan limbah aluminium, sekaligus mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah.

Kata kunci: California Bearing Ratio; tanah dasar; limbah aluminium; limbah kaca; stabilisasi tanah

1. PENDAHULUAN

Jalan merupakan salah satu prasarana (infrastruktur) transportasi jalan yang sangat penting untuk melayani pergerakan angkutan orang dan barang. Pergerakan angkutan sangat dipengaruhi oleh infrastruktur jalan berkualitas, yang merupakan faktor penting dalam pertumbuhan ekonomi. (Pandey & Lalamentik, 2014). Perkerasan jalan adalah lapisan perkerasan yang terletak di antara lapisan tanah dasar dan roda kendaraan, yang berfungsi memberikan pelayanan kepada transportasi, dan selama masa pelayanannya diharapkan tidak terjadi kerusakan yang berarti (Pasaribu & Manullang, 2021).

Lapis perkerasan lentur jalan terbagi atas lapis permukaan (*surface course*), lapis pondasi atas (*base course*), lapis pondasi bawah (*subbase course*) dan tanah dasar (*subgrade*). Faktor utama yang mempengaruhi tebal lapis perkerasan tersebut adalah beban lalu lintas (LHR), kondisi lingkungan dan karakteristik material. Jumlah LHR dihitung berdasarkan angka pertumbuhan lalu lintas pada saat, sebelum dan sesudah perkerasan jalan dilakukan. (Nuryati, 2015).

Pada suatu perencanaan konstruksi jalan raya, lapisan tanah dasar merupakan lapisan paling bawah yang berfungsi untuk meneruskan beban dari lapis perkerasan, namun tidak selamanya lapisan tanah dasar mampu berfungsi dengan

baik sebagai daya dukung. Hanya lapisan dengan klasifikasi baik dan stabil akan mampu berfungsi sebagai daya dukung dan memenuhi persyaratan teknis (Adha, 2009)

Dalam pembangunan infrastruktur jalan yang berkualitas memerlukan material dengan daya dukung tinggi untuk memastikan ketahanan terhadap beban lalu lintas. Salah satu kunci yang digunakan sebagai parameter untuk menilai kapasitas daya dukung tanah adalah menggunakan metode California Bearing Ratio (CBR). Nilai CBR yang rendah pada perkerasan jalan raya tentu akan mengakibatkan kerusakan pada jalan raya, seperti retak dan deformasi. Oleh karena itu, meningkatkan nilai CBR dengan melakukan penambahan bahan stabilisasi menjadi fokus penting dalam rekayasa geoteknik.

Peningkatan produksi dalam industri kaca dan aluminium terus meningkat seiring dengan perkembangan waktu. Hal ini tentu akan menyebabkan penumpukan limbah hasil industri yang dapat menjadi masalah serius bagi lingkungan, mengingat sifat dari kedua benda tersebut tidak mudah terurai.

Penambahan limbah aluminium pada tanah lempung dapat meningkatkan nilai CBR secara signifikan. Penambahan limbah aluminium ini mengindikasikan bahwa penambahan 8% limbah aluminium menghasilkan peningkatan nilai CBR hingga 4,02%, sementara nilai pengembangan tanah menurun seiring dengan peningkatan persentase limbah aluminium (Andriza et al., 2021).

Selain itu, penggunaan limbah kaca juga dapat digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah lempung. Hal ini ditunjukkan dengan adanya peningkatan nilai pada CBR tanpa perendaman dengan penambahan serbuk kaca sebesar 2%, 4%, 8%, dan limbah gypsum 8% dengan lama waktu pemeraman 1 hari sebesar 6,37%, 7,16%, dan 8,46%, pada pemeraman 3 hari sebesar 6,93%, 8,79%, dan 9,77%, dan pada waktu pemeraman 7 hari sebesar 8,32%, 10,04%, dan 11,44%. (Mudhakir, 2021).

Hasil uji CBR tanah asli yang awalnya sebesar 3,217% mengalami kenaikan sejak persentase penambahan WGP terkecil yaitu penambahan 2,5%, nilai CBR tanah asli mengalami kenaikan menjadi 5,839%. Pada persentase penambahan WGP 5%, nilai tersebut kembali naik menjadi 6,694%. Persentase penambahan WGP yang optimum berada pada penambahan 10% dengan nilai CBR sebesar 10,970%. Nilai CBR mengalami penurunan saat persentase WGP penambahan 15% menjadi 4,384%. Saat persentase WGP diperbesar lagi menjadi 25%, nilai CBR nya pun kembali turun menjadi 3,502%. Besar kemungkinan nilai CBR akan terus menurun jika persentase serbuk kaca yang ditambahkan dibuat lebih besar lagi (Bhakti & Wulandari, 2023).

Nilai California Bearing Ratio (CBR) pada kondisi kering (*unsoaked*) dan basah (*soaked*) dari tanah murni masing-masing adalah 2,32% dan 1,56%. Nilai CBR pada kondisi kering meningkat menjadi 22,5% setelah ditambahkan 10% bubuk kaca. Nilai CBR pada kondisi basah juga meningkat menjadi 10,4% ketika dicampur dengan 10% bubuk kaca. Pengaruh perubahan pada kedua kondisi tersebut terhadap penambahan bubuk kaca disajikan dalam Tabel 6. Peningkatan nilai CBR ini kemungkinan disebabkan oleh mekanisme transfer geser antara tanah dan bubuk kaca, serta peningkatan kekuatan yang mungkin berasal dari reaksi pozzolanik campuran bubuk kaca (Javed & Chakraborty, 2020).

Penambahan persentase WGP (Waste Glass Powder) hingga 15% meningkatkan nilai CBR dari sampel, namun setelah itu terjadi penurunan. Sebagai contoh, nilai CBR pada tanah ekspansif awalnya sebesar 4,5%, meningkat menjadi 12,2% saat dicampur dengan 15% WGP, lalu menurun menjadi 10,8% ketika kandungan WGP ditingkatkan menjadi 25%. Perubahan nilai CBR akibat penambahan 15% WGP menunjukkan peningkatan lebih dari 171%, yang merupakan kontribusi signifikan dari penambahan WGP terhadap performa CBR sampel. Hal ini disebabkan oleh pengisian rongga antar butir tanah ekspansif oleh WGP yang berfungsi meningkatkan daya dukung keseluruhan sampel hingga kadar 15% WGP. Selain itu, peningkatan nilai CBR juga disebabkan oleh naiknya kepadatan kering maksimum (MDD) seiring dengan penambahan WGP, yang pada akhirnya menyebabkan nilai CBR dan UCS (*Unconfined Compressive Strength*) meningkat (Blayi et al, 2020).

Penelitian yang mengkaji kombinasi limbah aluminium dan kaca dalam upaya meningkatkan nilai CBR masih cukup terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan campuran limbah aluminium dan kaca terhadap nilai CBR dalam pekerjaan perkerasan jalan. Dengan adanya hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif solusi dalam pemanfaatan limbah industri, sekaligus meningkatkan kualitas dan daya tahan infrastruktur jalan.

Batasan masalah

Batasan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Data tanah yang digunakan berasal dari PIK 2, Tangerang, Banten.
- Penelitian ini akan berfokus dalam mencari peningkatan nilai CBR dengan campuran limbah kaca sebesar 4%, 8% dan 12% serta limbah aluminium sebesar 4%, 8%, dan 12%.

- Persentase bahan campuran limbah aluminium dan kaca dilakukan terhadap berat sampel tanah.
- Kadar air optimum ditetapkan melalui hasil pengujian kompaksi modifikasi tanah lanau.
- Penelitian akan dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil Universitas Tarumanagara.

Rumusan masalah

Berdasarkan penelitian diatas, rumusan masalah dijelaskan sebagai berikut:

- Perbandingan nilai CBR yang diperoleh dari penggunaan campuran limbah kaca dan limbah aluminium sebagai bahan stabilisasi tanah.
- Analisis efektivitas limbah kaca dan limbah aluminium dalam meningkatkan nilai CBR tanah lempung sebagai lapisan subgrade perkerasan jalan.

Tujuan penelitian

Berdasarkan penjelasan diatas, Adapun tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

- Perbandingan nilai CBR yang ditingkatkan dengan menggunakan bahan campuran limbah kaca dan limbah aluminium
- Efektivitas dari limbah kaca dan limbah aluminium dalam meningkatkan nilai CBR.

Uji California Bearing Ratio

Pengujian CBR adalah pengujian yang bertujuan untuk mendapatkan nilai CBR yang merupakan sebuah perbandingan antara kualitas tanah yang diuji terhadap angka *standard* dari *sub base*, *sub grade*, dan *base* dari *pavements*.

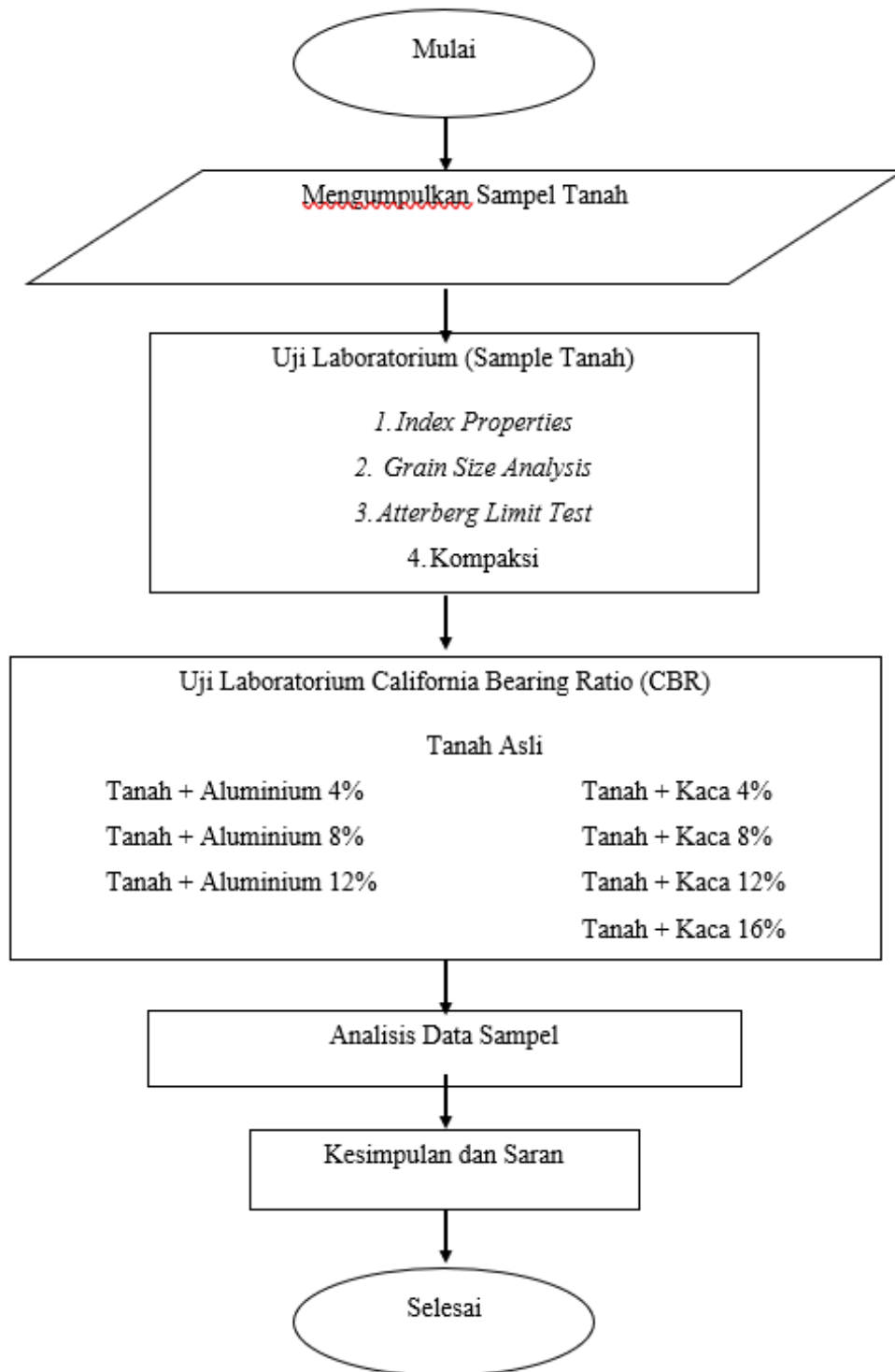
Tabel 1. Kekuatan dan Lapisan California Bearing Ratio (Bowles, 1992)

| C.B.R. no. | General Rating | Uses |
|------------|----------------|--------------|
| 0 – 3 | Very poor | Subgrade |
| 3 – 7 | Poor to fair | Subgrade |
| 7 – 20 | Fair | Subbase |
| 20 – 50 | Good | Base Subbase |
| >50 | Excellent | Base |

Nilai CBR yang dihasilkan dapat merujuk pada Tabel 1 apabila nilai CBR yang diperoleh semakin besar maka lapisan perkerasan jalan yang dibutuhkan akan semakin tipis. Sebaliknya, apabila nilai CBR yang diperoleh semakin kecil maka lapisan perkerasan jalan yang dibutuhkan akan semakin tebal. Oleh karena itu, daya dukung tanah dasar merupakan nilai kemampuan lapisan tanah dalam menahan beban setelah proses pemadatan sudah dilakukan.

2. METODE PENELITIAN

Pengujian yang akan dilakukan di laboratorium, yaitu pengujian karakteristik tanah, pengujian pemadatan tanah metode modifikasi yang mengikuti standar ASTM D1883. Pengujian California Bearing Ratio (CBR) meliputi pengujian CBR tanah asli, pengujian CBR tanah asli yang dicampurkan dengan limbah kaca dan aluminium yang sudah lolos saringan nomor 4. Metode pencampuran dilakukan dengan persentase limbah campuran terhadap massa tanah asli dengan spesifikasi ukuran campuran telah lolos saringan nomor 4 dan waktu pemeraman selama 1 hari. Berikut merupakan diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian sebagai acuan jalannya pengerjaan skripsi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

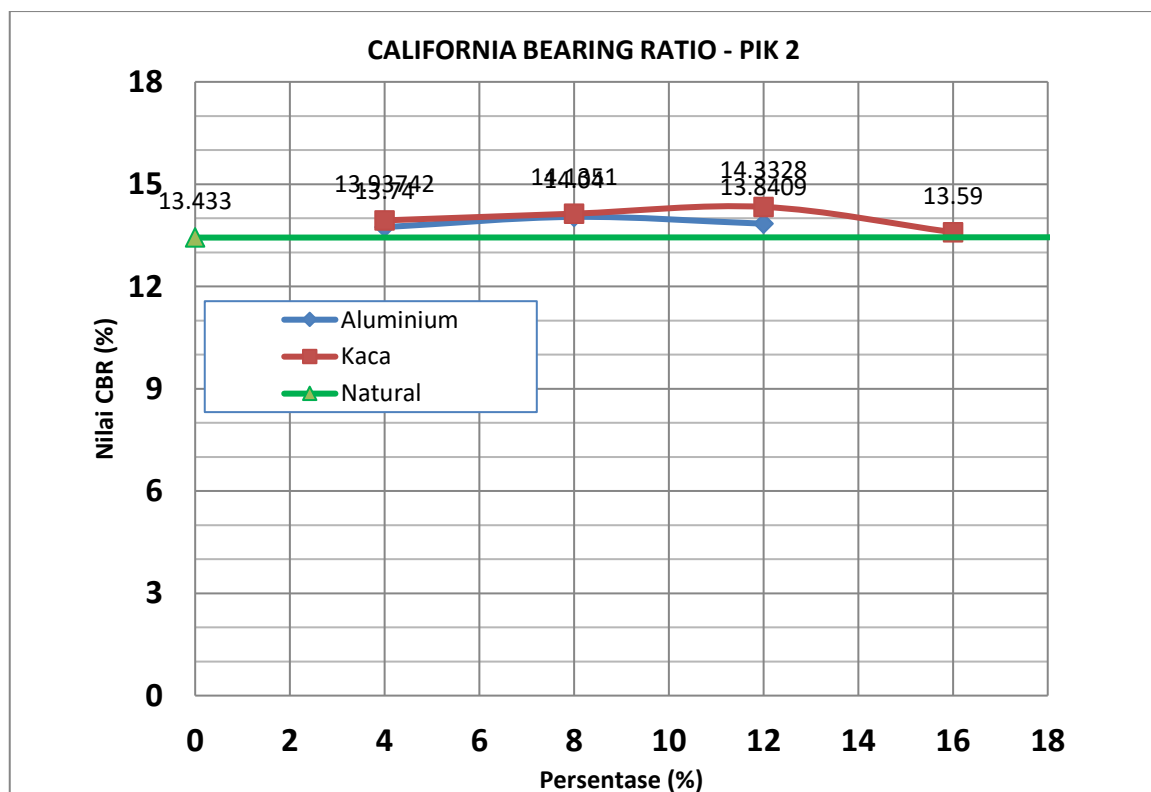
Berikut merupakan data hasil uji dari pengujian *Index Properties*, *Atterberg Limit*, *Grain Size Analysis*, dan *Kompaksi* untuk mengetahui karakteristik tanah yang akan dilakukan percobaan peningkatan daya dukung.

Tabel 2. Sifat dan karakteristik tanah

| No. | Pengujian | Parameter yang Dicari | Hasil Pengujian |
|-----|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1 | <i>Index Properties</i> | <i>Specific Gravity</i> | 2,70 |
| 2 | <i>Atterberg Limit Test</i> | <i>Liquid Limit</i> | 60,96% |
| | | <i>Plasticity Index</i> | 43,28% |
| 3 | <i>Grain Size Analysis</i> | Batuan | 3,97% |
| | | Pasir | 16,17% |
| | | Lanau | 76,5% |
| | | Lempung | 3,84% |
| 4 | Kompaksi | Kadar Air Optimum (OMC) | 31% |
| | | Kepadatan Kering Maksimum (MDD) | 1,4 gram/cm ³ |

Dari pengujian karakteristik tanah yang ditampilkan pada tabel 2, didapatkan spesifikasi tanah berupa tanah lanau. Tanah lanau adalah tanah yang mengandung partikel lanau. Memiliki ciri-ciri warna yang cenderung gelap, bertekstur halus dan banyak menyimpan air. Tanah ini umumnya memiliki kapasitas daya dukung tanah yang rendah. (Mahendra et al., 2025)

Dari pengujian karakteristik tanah juga didapatkan nilai *water content* optimum sebesar 31% dan kepadatan tanah maksimum sebesar 1,4 gram/cm³. Setelah didapatkan data tersebut maka dilakukan pengujian California Bearing Ratio (CBR) dengan penambahan air maksimum yang mengacu pada water konten optimum dengan sampel yang terdiri dari tanah asli, tanah dengan campuran aluminium sebesar 4%, 8%, 12%, dan tanah dengan campuran kaca sebesar 4%, 8%, 12%. Berikut grafik dan table dari hasil uji California Bearing Ratio (CBR).



Gambar 2. Grafik hasil uji CBR tanah lanau dengan campuran aluminium dan kaca

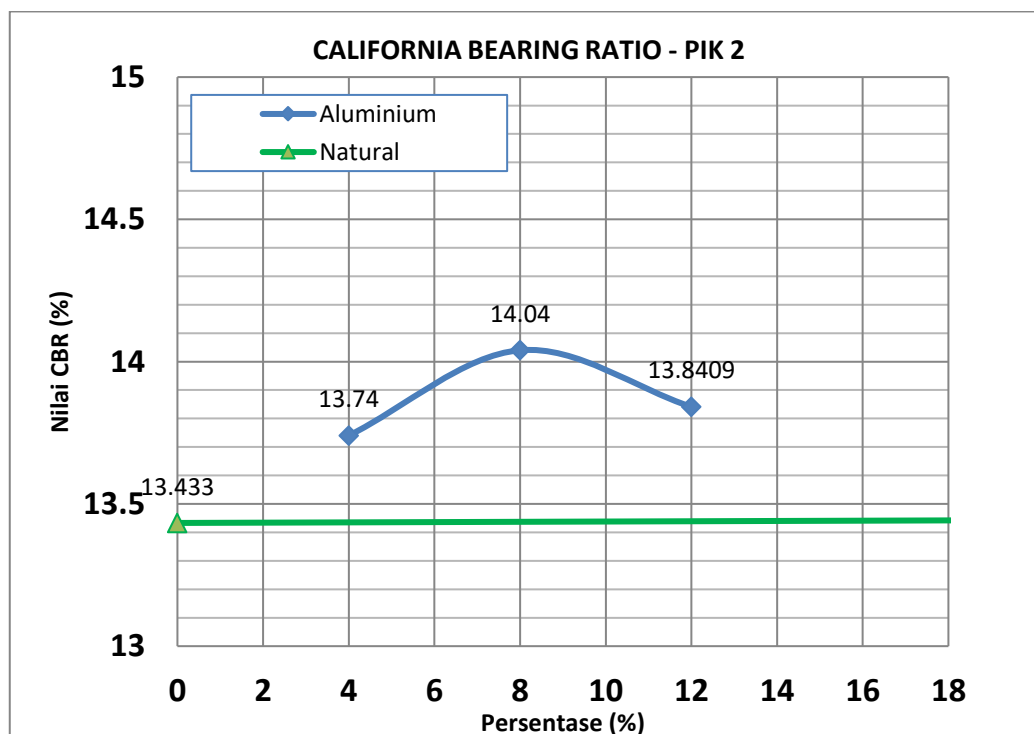
Tabel 3. Nilai hasil uji CBR tanah lanau dengan campuran aluminium

| Sampel | CBR (%) |
|---------------|---------|
| Natural | 13,443 |
| Aluminium 4% | 13,739 |
| Aluminium 8% | 14,036 |
| Aluminium 12% | 13,841 |

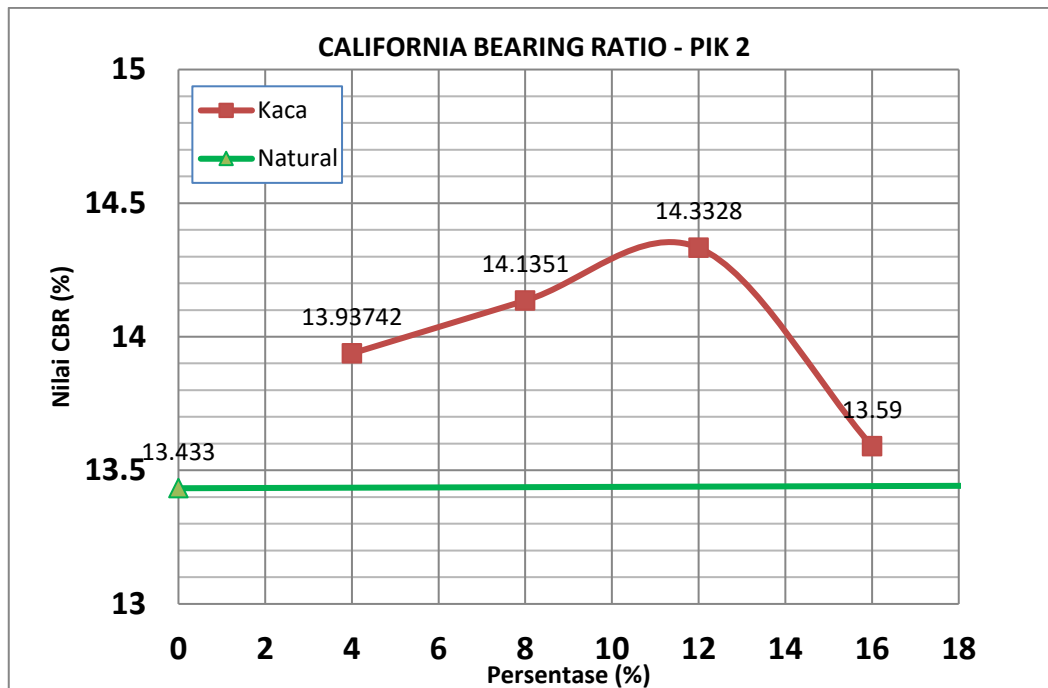
Tabel 4. Nilai hasil uji CBR tanah lanau dengan campuran kaca

| Sampel | CBR (%) |
|----------|---------|
| Natural | 13,443 |
| Kaca 4% | 13,937 |
| Kaca 8% | 14,135 |
| Kaca 12% | 14,332 |
| Kaca 16% | 13,555 |

Pada hasil uji yang ditampilkan dari tabel 3 dan 4 dapat dilihat jika pada campuran kaca memiliki kenaikan nilai CBR yang lebih besar dibandingkan dengan campuran aluminium. Pada gambar 2 juga terlihat bahwa campuran aluminium sudah mencapai titik kenaikan tertinggi pada persentase campuran 8% dan mengalami penurunan pada persentase campuran 12%. Hal ini disebabkan karena limbah aluminium hanya berfungsi untuk mengisi rongga-rongga pada tanah untuk meningkatkan kepadatan tanah, bukan sebagai campuran dengan tanah. Oleh karena itu, semakin besar persentase aluminium tidak berarti semakin besar pula nilai daya dukung tanahnya. Sedangkan pada campuran kaca nilai CBR terus mengalami kenaikan hingga persentase campuran 12%, dan mengalami penurunan pada campuran 16%.



Gambar 3 Grafik kenaikan nilai CBR tanah lanau dengan campuran aluminium terhadap tanah asli



Gambar 4. Grafik kenaikan nilai CBR tanah lanau dengan campuran kaca terhadap tanah asli

Pada gambar 3 dan 4 menunjukkan hasil dari uji test CBR tanah lempung PIK 2 yang dicampur menggunakan bahan campuran limbah aluminium dan kaca dengan persentase sebesar 4%, 8%, dan 12. Setelah melakukan uji tes CBR didapatkan nilai CBR yang dicampur dengan limbah aluminium dan kaca mengalami kenaikan nilai terhadap nilai CBR natural dengan persentase yang berbeda-beda.

Tabel 5 dan 6 merupakan hasil dari persentase kenaikan nilai CBR dengan bahan campuran limbah kaca dan aluminium terhadap tanah asli.

Tabel 5. Persentase kenaikan nilai CBR tanah lanau dengan campuran aluminium terhadap tanah asli

| Sampel | CBR (%) | Kenaikan Nilai CBR (%) |
|---------------|---------|------------------------|
| Natural | 13,443 | - |
| Aluminium 4% | 13,739 | 2,21 |
| Aluminium 8% | 14,036 | 4,42 |
| Aluminium 12% | 13,841 | 2,95 |

Tabel 6. Persentase kenaikan nilai CBR tanah lanau dengan campuran kaca terhadap tanah asli

| Sampel | CBR (%) | Kenaikan Nilai CBR (%) |
|----------|---------|------------------------|
| Natural | 13,443 | - |
| Kaca 4% | 13,937 | 3,67 |
| Kaca 8% | 14,135 | 5,14 |
| Kaca 12% | 14,332 | 6,61 |
| Kaca 16% | 13,555 | 0,818 |

Berdasarkan data dari hasil uji coba tersebut, kenaikan nilai CBR terhadap CBR natural paling besar adalah dengan persentase campuran sebesar 12%, lalu diikuti oleh campuran kaca 8%, aluminium 8%, kaca 4%, aluminium 12%, dan yang mengalami kenaikan paling kecil adalah campuran aluminium dengan persentase campuran 4%.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

- Kenaikan nilai CBR tanah lanau dengan campuran aluminium paling tinggi berada di campuran aluminium 8% dengan nilai 14,036% dan persentase kenaikan terhadap nilai CBR natural sebesar 4,421%, sedangkan kenaikan nilai CBR tanah lempung dengan campuran kaca paling tinggi berada di campuran kaca 12% dengan nilai 14,332% dan persentase kenaikan terhadap nilai CBR natural sebesar 6,617%.
- Persentase bahan campuran yang semakin besar, tidak menjadi faktor penjamin semakin naik nilai CBR. Hal ini dapat dilihat pada nilai CBR dengan campuran aluminium 8% ditunjukkan nilai CBR sebesar 14,036% dan turun pada campuran 12%, tetapi pada campuran aluminium 12% ditunjukkan nilai CBR sebesar 14,332% dan turun pada campuran 16%.
- Pada bahan campuran kaca, penambahan bahan campuran yang semakin besar dapat meningkatkan nilai CBR semakin besar. Hal ini dapat dilihat dari nilai CBR dengan campuran kaca 4% menunjukkan nilai sebesar 13,937%, campuran 8% menunjukkan nilai sebesar 14,135%, dan pada campuran 12% menunjukkan nilai sebesar 14,33%.
- Parameter dari tinggi atau rendahnya daya dukung tanah dapat dilihat dari nilai CBR yang dihasilkan, semakin tinggi nilai CBR yang dihasilkan maka semakin tinggi juga daya dukung tanahnya. Hal ini tentu akan berpengaruh pada seberapa tebal dan tipisnya suatu lapisan perkerasan.
- Limbah kaca lebih efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah daripada limbah aluminium. Hal ini dapat dilihat dari nilai CBR yang dihasilkan oleh limbah kaca terus mengalami kenaikan hingga persentase campuran kaca sebesar 12% dan mengalami penurunan pada persentase 16% dengan nilai optimum kaca lebih besar daripada nilai optimum aluminium, sedangkan limbah aluminium mengalami keadaan optimum pada persentase 8% dan mengalami penurunan di persentase 12% yang dimana membuat limbah aluminium kehilangan efektivitas jika dalam jumlah yang berlebihan.

Saran

- Pada pengujian dengan campuran aluminium, diperlukan pengujian dengan persentase yang lebih besar 8% dan kurang dari 12% untuk menemukan titik tertinggi kenaikan nilai CBR dengan campuran aluminium.
- Pada pengujian dengan campuran kaca, diperlukan eksplorasi yang lebih luas lagi mengenai bahan campuran tambahan sebagai pendamping kaca misalnya pasir kaolin dikarenakan campuran kaca cukup berpotensi dalam meningkatkan nilai CBR pada tanah

DAFTAR PUSTAKA

- Adha, I. (2009). Pengaruh durabilitas terhadap daya dukung stabilisasi tanah menggunakan lempung plastisitas rendah dengan kapur. *Jurnal Rekayasa*, 13, 239-246.
- Andriza, M. L., Kamil, I., & Ahmad, R. (2021). Perkuatan tanah lempung dengan limbah aluminium. *SNITT-Politeknik Negeri Balikpapan 2021*, 5, 127-132.
- Bhakti, B. M., & Wulandari, S. (2023). Pengaruh penambahan serbuk kaca pada stabilisasi. *Rekayasa sipil*, 17, 94-100. doi:<https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2023.017.01.13>
- Blayi, R. A., Sherwani, A. S., Ibrahim, H. H., Faraj, R. H., & Daraei, A. (2020). Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00427. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00427>
- Javed, S. A., & Chakraborty, S. (2020). Effects of waste glass powder on subgrade soil improvement. *World Scientific News*, 144, 30-42.
- Mahendra, B. Y., Susilo, A. J., & Sandjaja, G. (2025). Persentase kenaikan nilai cbr tanah lanau halim yang diperkuat dengan limbah c&d pada berbagai proporsi. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8, 273-280.
- Mudhakir, I., Nurhidayati, A., & Suprimurtiono, E. (2021). Pengaruh penambahan limbah serbuk kaca dan gypsum terhadap nilai cbr dan kuat geser tanah lempung. 6, 50-56. doi:<https://doi.org/10.20961/ijcee.v6i1.53691>
- Nuryati, S. (2015). Analisis tebal lapis perkerasan dengan metode bina. *Bentang: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Teknik Sipil*, 3(1), 32-49. doi:<https://doi.org/10.33558/bentang.v3i1.382>
- Pandey, S. V., & Lalamentik, L. (2014). Kelas jalan daerah untuk angkutan barang. *Tekno sipil*, 12, 27-37. doi:<https://doi.org/10.35793/jts.v12i60.5596>
- Pasaribu, H., & Simanullang, M. T. (2021). Hubungan kekuatan tanah dasar dengan perkerasan kaku. *Construct: Jurnal Teknik Sipil*, 1, 1-10.
- Bowles, J. E. (1992). *Engineering properties of soils and their measurement* (4th ed.). McGraw-Hill.