

Pengaruh Penambahan Slag Nikel dan *Fly Ash* terhadap Stabilitas Tanah Lunak di Obi

Irnowaty^{1*}, Muhammad Darwis², Faisal Rajab³

Universitas Khairun Ternate dan Jalan Jusuf Abdulrahman Kampus Gambesi Ternate Maluku Utara^{1,2,3}

*Corresponding author: innacivilumi@gmail.com

ABSTRAK

Tanah lunak memiliki daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan potensi penurunan yang signifikan sehingga sering menimbulkan masalah pada pembangunan infrastruktur, terutama di daerah pesisir seperti Pulau Obi, Maluku Utara. Untuk mengatasi hal tersebut, stabilisasi tanah dengan bahan tambah dari limbah industri menjadi solusi yang efektif sekaligus ramah lingkungan. Slag nikel, sebagai limbah padat hasil pengolahan bijih nikel, serta fly ash, sebagai residu pembakaran batubara, berpotensi dimanfaatkan untuk meningkatkan stabilitas tanah melalui mekanisme perbaikan sifat fisik maupun kimia. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan slag nikel dan fly ash terhadap sifat teknis tanah lunak di Obi. Metode penelitian dilakukan melalui uji laboratorium dengan variasi campuran slag nikel dan fly ash. Pengujian meliputi proctor standar untuk mengetahui hubungan kadar air dan kepadatan tanah, serta uji CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) pada kondisi rendaman dan tanpa rendaman untuk menilai daya dukung tanah. Hasil uji Proctor menunjukkan bahwa penambahan slag nikel dan fly ash dapat meningkatkan kepadatan kering maksimum serta menurunkan kadar air optimum dibandingkan tanah asli. Sementara itu, hasil uji CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) menunjukkan adanya peningkatan nilai CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) baik pada kondisi tanpa rendaman maupun rendaman. Pada kondisi tanpa rendaman, campuran slag nikel-fly ash mampu meningkatkan nilai CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) hingga lebih dari 50% dibandingkan tanah asli. Pada kondisi rendaman, meskipun nilai CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) mengalami penurunan, campuran masih menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan tanah tanpa stabilisasi. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa kombinasi slag nikel dan fly ash efektif meningkatkan kepadatan dan daya dukung tanah lunak di Obi. Kontribusi penelitian ini tidak hanya memberikan alternatif teknik perbaikan tanah untuk mendukung pembangunan infrastruktur, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan pemanfaatan limbah industri sebagai material stabilisasi yang ramah lingkungan

Kata kunci :

Fly ash; Maluku Utara; Slag nikel; Tanah lunak; Pulau Obi

ABSTRACT

*Soft soil is characterized by low bearing capacity, high compressibility, and significant settlement potential, which often causes problems in infrastructure development, particularly in coastal areas such as Obi Island, North Maluku. To address this issue, soil stabilization using industrial by-products has become an effective and environmentally friendly solution. Nickel slag, a by-product of nickel ore processing, and fly ash, a residue from coal combustion, have the potential to improve soil stability through both physical and chemical mechanisms. This study aims to analyze the effect of adding nickel slag and fly ash on the engineering properties of soft soil in Obi. The research method involved laboratory testing with varying proportions of nickel slag and fly ash. The tests conducted were the **Standard Proctor test** to determine the relationship between water content and soil compaction, and the **California Bearing Ratio (CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)) test** under soaked and unsoaked conditions to evaluate soil bearing capacity. The Proctor test results indicated that the addition of nickel slag and fly ash increased the maximum dry density and reduced the optimum moisture content compared to the untreated soil. Meanwhile, the CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) test results showed a significant improvement in soil strength. In the unsoaked condition, the mixture of nickel slag and fly ash increased the CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) value by more than 50% compared to the natural soil. Under soaked conditions, although the CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) values decreased, the stabilized soil still demonstrated a substantial improvement compared to untreated soil. In conclusion, the combination of nickel slag and fly ash is effective in enhancing the compaction characteristics and bearing capacity of soft soil in Obi. The contribution of this study lies not only in providing an alternative soil stabilization technique to support infrastructure development but also in promoting sustainable practices by utilizing industrial waste as a green stabilization material.*

Keywords :

Fly ash; Nickel slag; North Maluku; Obi Island; Soft soil

PENDAHULUAN

Tanah lunak merupakan salah satu jenis tanah dengan sifat mekanik yang kurang mendukung untuk konstruksi. Karakteristik yang umum ditemui antara lain daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, serta potensi penurunan yang besar sehingga dapat mengancam stabilitas bangunan maupun infrastruktur di atasnya (Pratiwi et al., 2018). Kondisi ini sering ditemukan di daerah pesisir dan pulau kecil, termasuk wilayah Obi, Maluku Utara. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan tanah yang efektif, ekonomis, serta ramah lingkungan.

Salah satu metode perbaikan tanah yang banyak dikembangkan adalah stabilisasi tanah dengan penambahan material tambahan. Stabilisasi bertujuan memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah, seperti menurunkan indeks plastisitas, meningkatkan kepadatan, serta meningkatkan kekuatan geser tanah (Nugroho et al., 2018). Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan limbah industri menjadi perhatian khusus karena selain berpotensi meningkatkan kualitas tanah, juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan.

Slag nikel merupakan limbah padat hasil pengolahan bijih nikel yang banyak tersedia di Maluku Utara. Material ini kaya akan kandungan silikat dan oksida logam yang dapat memberikan kontribusi pada peningkatan kekuatan tanah (Widodo et al., 2022). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan slag nikel mampu meningkatkan nilai California Bearing Ratio (CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)) tanah lempung, sehingga layak dipertimbangkan sebagai bahan stabilisasi (Sutrisno et al., 2021).

Selain slag nikel, fly ash juga telah lama digunakan sebagai bahan pozzolan dalam perbaikan tanah. Fly ash mengandung silika dan alumina yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk senyawa pengikat, sehingga meningkatkan kuat tekan bebas dan mengurangi plastisitas tanah (Sari & Utami, 2019; Rahmawati & Hadi, 2020). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fly ash dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas tanah lempung hingga 2–3 kali lipat dibandingkan kondisi asli.

Kombinasi slag nikel dan fly ash dinilai dapat memberikan efek sinergis, karena slag berperan memperbaiki sifat fisik tanah, sedangkan fly ash meningkatkan sifat kimia melalui reaksi pozzolanik. Penelitian terbaru melaporkan bahwa penggunaan campuran keduanya mampu meningkatkan kuat geser tanah hingga 40–60%, yang menunjukkan potensi besar dalam perbaikan tanah lunak (Yuliani et al., 2021).

METODE

1. Lokasi Pengambilan Sampel Tanah

Sampel tanah diambil dari wilayah Obi Barat, Kabupaten Halmahera Selatan, Maluku Utara, yang didominasi oleh tanah lunak berjenis lempung. Pengambilan sampel dilakukan dengan metode *disturbed sampling* menggunakan *hand auger* hingga kedalaman $\pm 1,5$ meter dari permukaan tanah. Sampel tanah kemudian dikeringkan udara (*air-dried soil*), dihancurkan, dan diayak melalui saringan No. 4 (4,75 mm) sebelum dilakukan pengujian.

2. Bahan Tambah

Slag Nikel dan Fly Ash secara langsung dilokasi Perusahaan pertambangan Obi Kawasi, kecamatan Obi Barat Kabupaten Halmahera Selatan, Maluku Utara.

3. Variasi Campuran

Campuran tanah dengan slag nikel dan fly ash dibuat dalam beberapa variasi berdasarkan persentase terhadap berat kering tanah:

Tabel 1. Komposisi Campuran Tanah, Slag Nikel dan Fly Ash

Tanah (%)	Slag Nikel (%)	Fly Ash (%)
100	-	-
50	25	25
50	30	20

Sumber : Hasil Pengujian

4. Pengujian Laboratorium

Pengujian dilakukan di laboratorium mekanika tanah dengan prosedur sebagai berikut:

- Uji Sifat Fisik Tanah

Uji sifat fisik tanah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar tanah lunak yang digunakan sebagai sampel penelitian. Parameter yang diuji meliputi kadar air alami, berat jenis butiran tanah, batas Atterberg (batas cair, batas plastis, dan indeks plastisitas), serta distribusi ukuran butiran. Pengujian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan jenis tanah serta menentukan tingkat kelayakannya sebagai material dasar konstruksi. Hasil pengujian sifat fisik tanah memberikan gambaran awal mengenai kondisi tanah asli sebelum dilakukan proses stabilisasi, serta menjadi acuan dalam menentukan metode perbaikan yang sesuai.

b. Uji Pemadatan Tanah

Uji pemadatan tanah dilakukan menggunakan metode Proctor standar untuk mengetahui hubungan antara kadar air dan kepadatan kering tanah. Sampel tanah dicampur dengan variasi kadar air kemudian dipadatkan dalam cetakan standar dengan energi tumbukan tertentu. Dari hasil pengujian diperoleh nilai kepadatan kering maksimum (γ_d max) dan kadar air optimum (OMC). Parameter ini penting untuk menentukan kondisi kadar air terbaik yang menghasilkan kepadatan maksimum, sehingga dapat memperkirakan perilaku tanah di lapangan setelah mengalami pemadatan. Dalam penelitian ini, uji pemadatan juga digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan slag nikel dan fly ash terhadap sifat pemadatan tanah lunak.

c. Uji California Bearing Ratio (CBR)

Uji CBR dilakukan untuk mengetahui daya dukung tanah terhadap beban lalu lintas, baik pada kondisi tanpa rendaman (*unsoaked*) maupun rendaman (*soaked*). Sampel tanah dipadatkan sesuai dengan kadar air optimum yang diperoleh dari uji Proctor, kemudian dilakukan penekanan piston pada kecepatan konstan. Nilai CBR diperoleh dari perbandingan beban penetrasi sampel terhadap beban standar pada kedalaman penetrasi tertentu (2,5 mm dan 5,0 mm). Uji tanpa rendaman menggambarkan kondisi tanah pada keadaan kering, sedangkan uji rendaman dilakukan setelah sampel direndam air selama periode tertentu untuk mensimulasikan kondisi jenuh. Hasil uji CBR memberikan informasi mengenai tingkat peningkatan daya dukung tanah setelah distabilisasi dengan slag nikel dan fly ash, serta ketahanannya terhadap kondisi jenuh air.

5. Analisis Data

Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara deskriptif dan komparatif, meliputi:

- Perubahan indeks plastisitas akibat penambahan slag nikel dan fly ash.
- Hubungan kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum (MDD) pada masing-masing variasi.
- Peningkatan nilai CBR pada setiap campuran.

HASIL

1. Karakteristik Tanah Asli

Berdasarkan hasil uji sifat fisik, tanah asli di OBI tergolong sebagai lempung dengan plastisitas tinggi (CH) menurut klasifikasi USCS. Nilai batas cair (LL) sebesar **60%**, batas plastis (PL) sebesar **35%**, sehingga indeks plastisitas (PI) adalah **30%**. Nilai kuat tekan bebas (UCS) awal sebesar $\pm 50 \text{ kN/m}^2$, menunjukkan tanah memiliki daya dukung rendah.

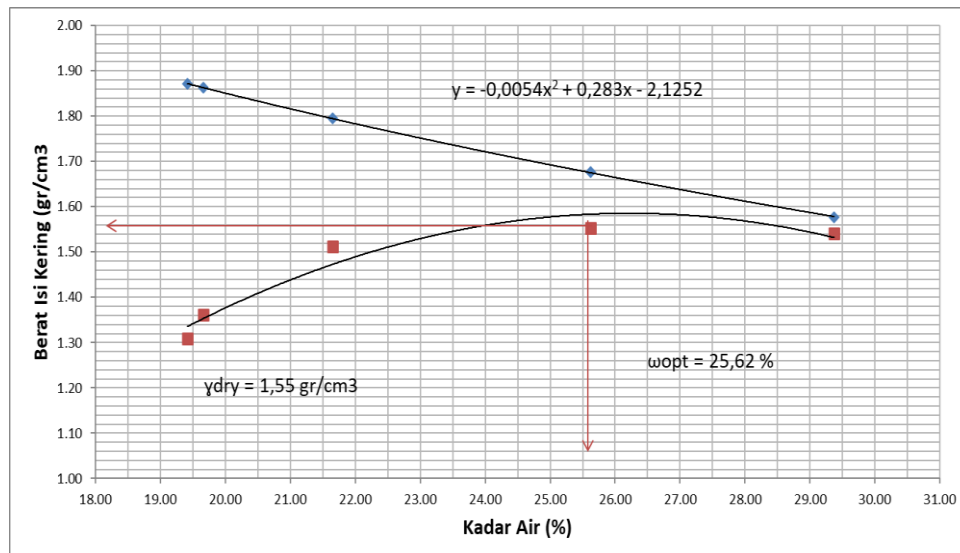
Tabel 2 : Sifat Fisik Tanah

Parameter	Nilai
Kadar Air (%)	22,47 %
Berat Jenis	2,94
Batas Cair	60 %
Batas Plastis	35 %
Indeks Plastisitas (PI)	25 %

Sumber : Hasil Pengujian

2. Hasil Uji Pemadatan

Metode pemadatan laboratorium menggunakan Standar Proctor yang mana pekerjaan pemadatan mengacu pada metode ASTM D 689, dimana tiap pengujian pemadatan penumbukan dilakukan sebanyak 25 kali tumbukan per tiga lapis, pada pemadatan tanah dilakukan penambahan kadar air 200 ml, 300 ml, 400 ml, 500 ml, dan 600 ml untuk mencari kadar air optimum.

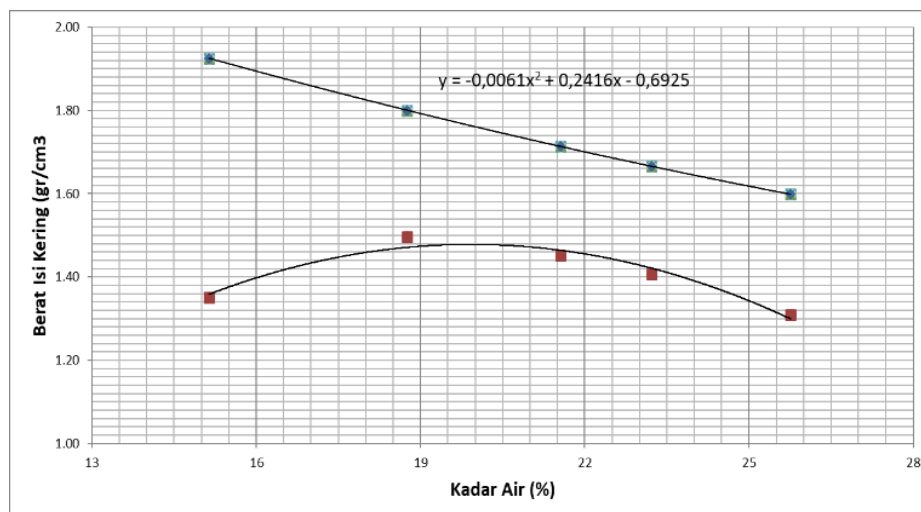


Gambar 1. Grafik pengujian pemadatan tanah setempat (OB)

Kurva pemadatan tanah dengan standar Proktor dibuat dengan cara menghubungkan nilai kadar air dan berat isi kering pada masing-masing pemadatan maka kurva pemadatan antara berat jenis pada masing-masing material dan kadar air 200 ml, 300 ml, 400 ml, 500 ml, dan 600 ml akan di gambarkan pada grafik.

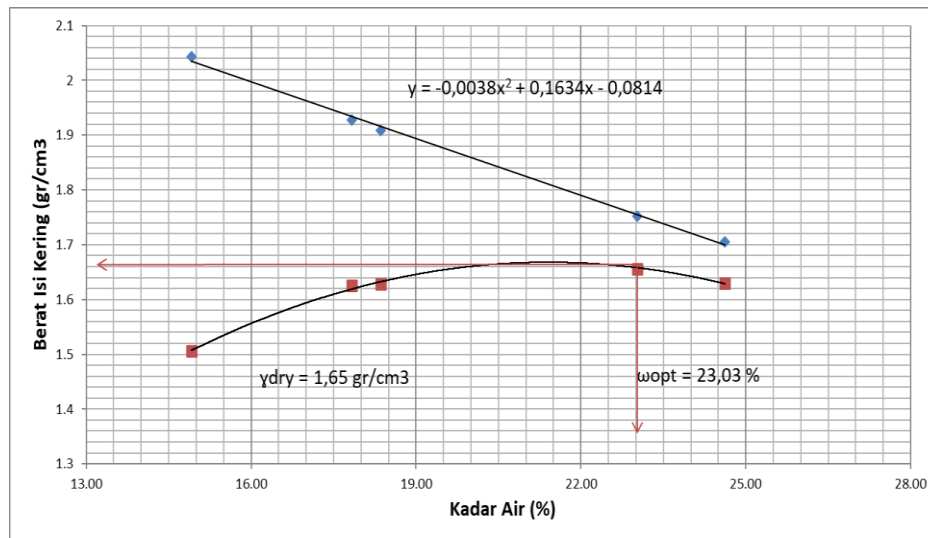
Data Hasil Pengujian Pemadatan Standar Proctor Material Tanah Setempat, dari tabel di atas, nilai berat isi kering tanah setempat (γ_d) pada penambahan kadar air 200 ml adalah 1,30 gr/cm³, pada penambahan kadar air 300 ml adalah 1,36 gr/cm³, pada penambahan kadar air 400 ml adalah 1,51 gr/cm³, pada penambahan kadar air 500 ml adalah 1,55 gr/cm³, pada penambahan kadar air 600 ml adalah 1,54 gr/cm³.

Dari gambar grafik pemadatan proctor Material Tanah Setempat, maka didapatkan kadar air optimum (OMC) sebesar 25,62 % pada berat volume kering tanah (MDD) sebesar 1,58 gr/cm³.



Gambar 2. Grafik pengujian pemadatan, tanah 50% + fly ash 25% + slag nikel 25%

Dari gambar grafik pemadatan proctor Material Tanah Setempat (50%) + Fly Ash (25%) + Slag Nikel (25%), maka didapatkan kadar air optimum (OMC) sebesar 18,75 % pada berat volume kering tanah (MDD) sebesar 1,69 gr/cm³.



Gambar 3. Grafik pengujian pemadatan, tanah setempat (50%) + fly ash (20%) + slag nikel (30%)

Data Hasil Pengujian Pemadatan Standar Proctor Material OB (50%) + FA (20%) + SN (30%). Dari tabel di atas, nilai berat isi kering (γ_d), pada penambahan kadar air 200 ml adalah 1,50 gr/cm^3 , pada penambahan kadar air 300 ml adalah 1,625 gr/cm^3 , pada penambahan kadar air 400 ml adalah 1,628 gr/cm^3 , pada penambahan kadar air 500 ml adalah 1,65 gr/cm^3 , pada penambahan kadar air 600 ml adalah 1,63 gr/cm^3 .

Dari gambar grafik pemadatan proctor Material Tanah Setempat (50%) + Fly Ash (20%) + Slag Nickel (30%), maka didapatkan kadar air optimum (OMC) sebesar 23,03 % pada berat volume kering tanah (MDD) sebesar 0,93 gr/cm^3 .

3. Hasil Uji California Bearing Ratio (CBR)

Penelitian kajian daya dukung tanah yang dilakukan ada 2 (dua) macam metode pengujian laboratorium yang dipakai sebagai pendekatan untuk mendapatkan daya dukung tanah. Pengujian dilakukan didasarkan pada metode ASTM D 1883-99. Tanah diuji nilai CBR kondisi soaked dan unsoaked pada kadar air optimum yang didapatkan dari pengujian proctor masing-masing sampel material.

Tabel 3. Hasil Uji California Bearing Ratio

No	NAMA	NILAI CBR (%)
1	Tanah Setempat (OB)	32,73
4	OB (50%) + FA (25%) + SN (25%)	39,26
5	OB (50%) + FA (20%) + SN (30%)	44,62

Sumber : Hasil Pengujian CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) Unsoaked

Pada Tabel 3 Nilai CBR Material Tanah Setempat, diperoleh pada penetrasi 0,2" sebesar 32,73%.

Grafik 4, memperlihatkan hubungan antara penurunan (inch) dengan beban (Lbs) pada pengujian California Bearing Ratio (CBR). Terlihat bahwa kurva mengalami peningkatan beban seiring bertambahnya penurunan. Pada tahap awal (penurunan sekitar 0,02–0,05 inch), beban yang mampu ditahan masih relatif rendah, yaitu sekitar 200–400 Lbs. Namun, ketika penurunan bertambah hingga 0,10–0,15 inch, beban yang ditahan meningkat signifikan mencapai kisaran 800–1.200 Lbs.

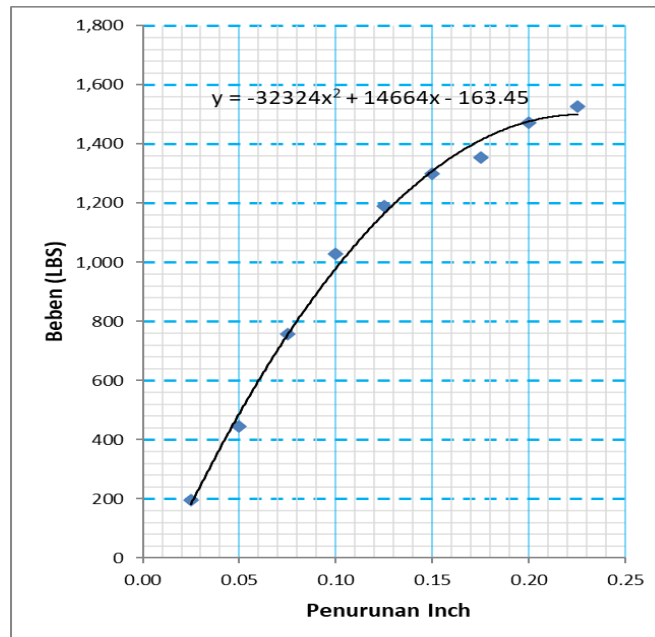
Peningkatan terus berlanjut hingga penurunan mencapai sekitar 0,20–0,22 inch, di mana beban maksimum yang dicapai mendekati 1.500–1.600 Lbs. Pola ini menggambarkan bahwa tanah hasil stabilisasi memiliki daya dukung yang meningkat secara progresif terhadap beban penetrasi.

Persamaan regresi kuadratik yang tercantum pada grafik, yaitu:

$$y = -32.324x^2 + 14664x - 163.45$$

Menunjukkan hubungan matematis antara beban dan penurunan. Kurva trendline yang sesuai dengan data pengujian menunjukkan bahwa model ini dapat digunakan untuk mendeskripsikan perilaku tanah terhadap pembebanan penetrasi.

Secara umum, grafik mengindikasikan bahwa tanah dengan perlakuan stabilisasi (misalnya penambahan slag nikel dan fly ash) memiliki peningkatan nilai CBR dibandingkan kondisi asli. Hal ini terbukti dari besarnya beban yang mampu ditahan pada setiap tingkat penurunan, sehingga tanah tersebut lebih layak digunakan sebagai lapisan dasar konstruksi perkerasan jalan maupun fondasi ringan.



Gambar 4. Grafik pengujian CBR Tanah Setempat

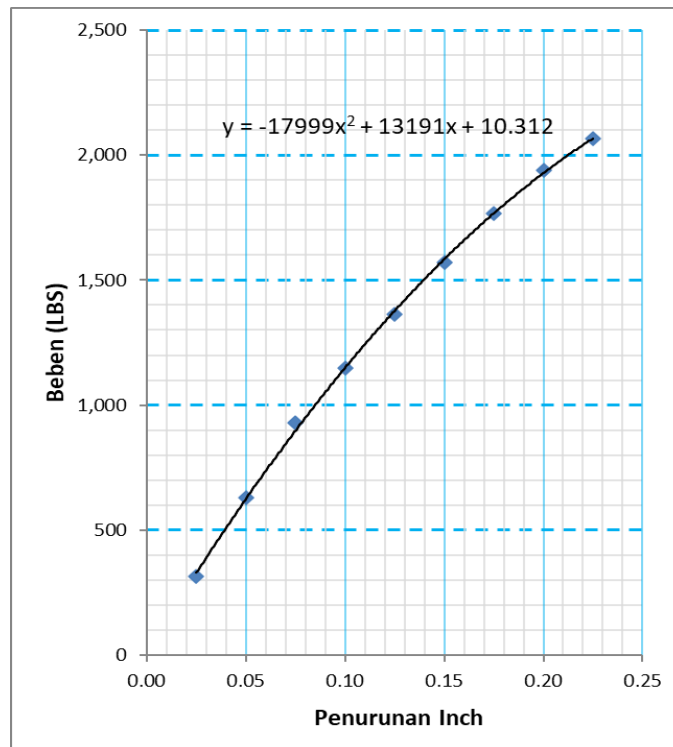
Grafik 5 menunjukkan hubungan antara penurunan (inch) dengan beban (Lbs) pada pengujian CBR. Terlihat adanya peningkatan beban yang signifikan seiring dengan bertambahnya penurunan. Pada penurunan awal sekitar 0,02–0,05 inch, beban yang mampu ditahan tanah berada pada kisaran 300–600 Lbs. Seiring bertambahnya penurunan hingga 0,10–0,15 inch, beban meningkat cukup tajam mencapai 1.000–1.500 Lbs.

Ketika penurunan mencapai 0,20–0,22 inch, nilai beban maksimum yang ditahan tanah mendekati 2.000 Lbs, menunjukkan bahwa tanah hasil perlakuan memiliki daya dukung yang relatif tinggi. Pola kurva yang membentuk lengkung nonlinier ini menggambarkan karakteristik deformasi tanah di bawah beban penetrasi.

Model ini sesuai dengan distribusi titik data yang diperoleh, sehingga dapat dipakai untuk memperkirakan daya dukung tanah pada kedalaman penetrasi lain yang tidak diuji secara langsung.

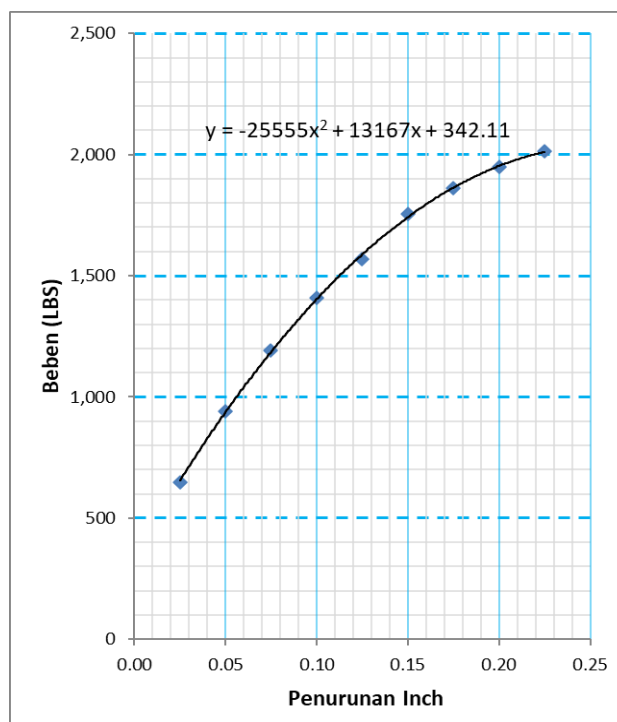
Hasil ini menegaskan bahwa tanah yang telah mengalami proses stabilisasi mampu menahan beban penetrasi lebih besar dibandingkan tanah asli. Dengan nilai CBR yang lebih tinggi, tanah ini lebih layak digunakan sebagai material lapisan dasar konstruksi perkerasan jalan, terutama untuk menahan beban lalu lintas yang sedang hingga berat.

Pada Tabel 4.5. Nilai CBR Material Tanah Setempat (50%) + Fly Ash (25%) + Slag Nickel (25%), penetrasi 0,1” sebesar 35,88 % dan pada penetrasi 0,2” sebesar 41,81% dimana kadar air sebesar 21,6%. Maka berdasarkan perhitungan dapat dipakai nilai CBR yang tertinggi yaitu 41,81 % pada penetrasi 0,2”.



Gambar 5. Grafik uji CBR Material Tanah Setempat 50% +Fly Ash 25% +Slag Nickel 25%

Pada Tabel 3. Nilai California Bearing Ratio (CBR) Material Tanah Setempat 50% + Fly Ash 25% + Slag Nickel 25%, penetrasi 0.1” sebesar 35,88 % dan nilai California Bearing Ratio (CBR) pada penetrasi 0,2” sebesar 41,81% dimana kadar air sebesar 21,6%. Maka berdasarkan perhitungan nilai California Bearing Ratio (CBR) dapat dipakai nilai California Bearing Ratio (CBR) yang tertinggi yaitu 41,81 % pada penetrasi 0,2”.



Gambar 6. Grafik uji CBR) Material Tanah Setempat 50% + Fly Ash 20% + Slag Nickel 30%.

Pada Tabel 3. Nilai California Bearing Ratio (CBR) Material Tanah Setempat 50% + Fly Ash 20% + Slag Nickel 30%, penetrasi 0.1” sebesar 47,45 % dan nilai California Bearing Ratio (CBR) pada penetrasi 0,2” sebesar 41,79 % dimana kadar air sebesar 18,4 %. Maka berdasarkan perhitungan nilai California Bearing Ratio (CBR) dapat dipakai nilai California Bearing Ratio (CBR) yang tertinggi yaitu 47,54 % pada penetrasi 0,1”

SIMPULAN

kombinasi slag nikel dan fly ash efektif meningkatkan kepadatan dan daya dukung tanah lunak di Obi. Kontribusi penelitian ini tidak hanya memberikan alternatif teknik perbaikan tanah untuk mendukung pembangunan infrastruktur, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan pemanfaatan limbah industri sebagai material stabilisasi yang ramah lingkungan

DAFTAR PUSTAKA

- Mohanty, S. K., Pradhan, P. K., & Mohanty, C. R. (2018). *Stabilization of expansive soil using industrial waste: Fly ash*. *Civil Engineering Research Journal*, 3(2).
<https://doi.org/10.19080/CERJ.2018.03.5555606>
- Nugroho, B., Handoko, A., & Sari, D. (2018). Stabilisasi tanah lempung dengan bahan tambah fly ash untuk meningkatkan daya dukung tanah. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 6(2), 45–52.
- Pratiwi, R., Santosa, H., & Wibowo, T. (2018). Karakteristik tanah lunak dan upaya perbaikannya untuk konstruksi infrastruktur. *Jurnal Infrastruktur*, 4(1), 12–20.
- Rahmawati, E., & Hadi, S. (2020). Pengaruh penambahan fly ash terhadap kuat tekan bebas tanah lempung ekspansif. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 14(1), 33–41.
- Sari, M., & Utami, D. (2019). Pemanfaatan fly ash sebagai bahan stabilisasi tanah lempung untuk perkerasan jalan. *Media Teknik Sipil*, 11(2), 88–95.
- Sutrisno, A., Wulandari, F., & Saputra, Y. (2021). Pengaruh penambahan slag nikel terhadap peningkatan nilai CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) tanah lempung. *Jurnal Geoteknik Indonesia*, 8(1), 23–31.
- Widodo, J., Ardiansyah, B., & Lestari, S. (2022). Potensi slag nikel sebagai material alternatif stabilisasi tanah di Maluku Utara. *Jurnal Sumber Daya Mineral Indonesia*, 3(2), 101–110.
- Yuliani, N., Nugraha, R., & Putra, A. (2021). Kombinasi slag nikel dan fly ash sebagai bahan stabilisasi tanah lempung. *Jurnal Material Konstruksi*, 9(3), 77–85.