



## ENGINEERING PROPERTIES TANAH LEMPUNG DENGAN SEMEN SEBAGAI SOIL IMPROVEMENT

Muthia Anggraini<sup>1\*</sup>, Alfian Saleh<sup>2</sup>, Virgo Trisep Haris<sup>3</sup>

<sup>1\*,2,3</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning  
Jl. Yos Sudarso Km 8 Rumbai-Pekanbaru  
Alamat e-mail: muthia@unilak.ac.id

### Info Artikel

### Abstrak

#### Sejarah Artikel:

Diterima: Juli 2024  
Disetujui: Agt 2024  
Dipublikasi: Des 2024

#### Keywords:

Soil Stabilisation; CBR;  
Plasticity Index

Ketidakstabilan volume pada tanah ekspansif akibat perubahan kadar air menyebabkan terjadi kerusakan pada struktur pendukungnya. *Soil improvement* merupakan usaha untuk perbaikan tanah. Stabilisasi tanah yaitu salah satu bagian dari *soil improvement*. Perbaikan tanah yang tepat perlu dilakukan untuk melihat kinerja tanah agar dapat memenuhi persyaratan stabilitas pasca konstruksi. Stabilisasi kimia menggunakan bahan tanah semen dapat memperbaiki *engineering propertis* tanah ekspansif. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis nilai *engineering propertis* tanah ekspansif dengan semen. Metode penelitian eksperimental menentukan nilai CBR dan batas konsistensi tanah. Tanah ekspansif distabilisasi dengan semen dengan variasi 10, 12, dan 14% semen menurut beratnya. Hasilnya nilai *engineering propertis* terjadi peningkatan nilai CBR yaitu nilai CBR maksimum sebesar 7,40% pada variasi 14% pada waktu pemeraman 7 hari. Nilai PI terkecil pada variasi semen 14% yaitu sebesar 13,65%, terjadi penurunan nilai PI dengan penambahan semen. Kesimpulannya *engineering propertis* tanah dengan stabilisasi semen meningkatkan nilai CBR tanah dan menurunkan nilai Indeks Plastisitas.

**Kata Kunci:** Stabilisasi Tanah, CBR, Indeks Plastisitas

### Abstract

*Volume instability in expansive soils due to changes in moisture content causes damage to the supporting structure. Soil improvement is an effort to improve soil. Soil stabilization is one part of soil improvement. Appropriate soil improvement needs to be conducted to see the performance of the soil to meet the post-construction stability requirements Chemical stabilization using cementitious soil materials can improve the mechanical properties of expansive soils. The research objective is to analyze the value of engineering properties of expansive soil with cement. Experimental research method of determining CBR values and soil consistency limits. Expansive soil was stabilized with cement with variations of 10, 12, and 14% cement by weight. As a result, the value of engineering properties increased, namely the maximum CBR value of 7.40% in the 14% variation at a curing time of 7 days. The smallest PI value in the 14% cement variation is 13.65%, there is a decrease in PI value with the addition of cement. In conclusion,*

## PENDAHULUAN

Tanah yang menunjukkan perubahan volumetric karena kadar air yang berubah dikategorikan sebagai tanah Ekspansif. Permasalahan tanah Ekspansif adalah akan mengembang apabila terkena air dan menyusut saat kering, sebuah fenomena yang biasanya terkait dengan fluktuasi kelembaban musiman [1]. Karakteristik tanah ekspansif menjadi hal yang menakutkan untuk konstruksi perkerasan jalan, apabila *subgrade* konstruksi jalan berada di atas tanah ekspansif. *Atterberg limis* sangat penting untuk menentukan sebagian besar *swelling* [2].

Permasalahan tanah ekspansif yang dapat merusak konstruksi di atasnya, sehingga perlu dilakukan perbaikan sifat-sifat teknis yang berhubungan dengan *subgrade* agar konstruksi jalan di atasnya dapat stabil terhadap pengaruh tanah [3]. Sifat kembang susut tanah ekspansif yang tinggi mengakibatkan kerusakan jalan seperti jalan berlubang. Pada permasalahan ini diperlukan penanganan khusus untuk *subgrade* yang berupa tanah ekspansif [3].

Tanah ekspansif pada dasarnya berdasarkan metode klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS) tergolong klasifikasi CH yaitu lempung *High Plasticity*. Plastis yaitu usaha tanah tetap pada volumenya tanpa ada retakan saat berdeformasi [4]. *Soil improvement* yaitu usaha untuk meningkatkan *bearing capacity* tanah Ekspansif. Salah satu cara *soil improvement* adalah stabilisasi dengan menggunakan bahan tambah. Bahan tambah yang sering digunakan yaitu *Flyash*, Semen, *Gypsum*, Kapus, dan Abu Sekam. Pada penelitian ini menggunakan zat aditif semen dengan variasi 10%,12%, dan 14%. Diharapkan variasi persentase ini dapat memperbaiki karakteristik tanah ekspansif.

Stabilisasi dengan bahan tambah semen dapat menaikkan stabilitas tanah seperti daya dukung tanah pada parameter fisis dan mekanis tanah [5]. Stabilisasi semen merupakan campuran semen, tanah, dan air untuk membentuk material yang kaku dan keras ketika dipadatkan [6]. Penambahan semen pada tanah ekspansif secara signifikan mengurangi kadar air tanah karena semen meningkatkan laju pengeringan tanah [2].

*Soil stabilization* ekspansif semen dapat dilakukan karena kandungan semen yang pozolanik yaitu apabila bereaksi dengan air akan mengikat dan mengeras. Sehingga jika

dicampur dengan semen, maka tanah Ekspansif yang sensitif terhadap perubahan *water content* akan menjadi stabil [7].

## TINJAUAN PUSTAKA

### Tanah Ekspansif

Tanah Ekspansif termasuk jenis lempung dengan kandungan sifat mineral Ekspansif yaitu terjadi pertukaran ion tinggi dan berpengaruh pada kembang susut tanah akibat perubahan kadar air [8]. Kandungan mineral tanah Ekspansif yaitu *Bentonit*, *Montmorillonite*, *Smektit*, *Atapulgit*, *Nontronite*, *Vermikulit*, *Klorit*, *Illite*, dan garam sulfat. Kandungan ini berdampak pada pengembangan tanah [9].

Tanah ekspansif berdasarkan Chen dan Raman (1967) dapat dilihat dari sifat plastisitas tanah seperti Tabel berikut [10]:

**Tabel 1.** Perbandingan Batas Plastis, Batas Susut dan Tingkat Pengembangan

PI (%)	SI (%)	Kategori Ekspansif
< 12	< 15	Rendah
12-23	15-30	Sedang
23-32	30-40	Tinggi
> 32	> 40	Sangat Tinggi

### Stabilisasi Tanah

Usaha yang dilakukan untuk menaikkan nilai daya dukung tanah yang dilakukan secara kimia ataupun mekanis disebut sebagai stabilisasi tanah [11]. Tata cara pelaksanaan stabilisasi tanah berdasarkan SNI – 03 – 3438 – 1994. Tata cara membuat stabilisasi tanah dengan semen pada jalan mengacu pada Pusjatan Balitbang Pekerjaan Umum [5]. *Soil stabilization* merupakan suatu metode *soil improvement* solusi tanah Ekspansif untuk memperbaiki kualitas dari tanah asli. Tujuannya untuk menaikkan nilai *Bearing Capacity* karena menahan beban dan menaikkan stabilitas tanah [8].

### Klasifikasi Tanah

Craig (2004) mendefinisikan tanah berdasarkan dari ukuran partikel yaitu Berangkal, Kerakal, Kerikil, Pasir, dan Lempung [12]. Untuk menentukan klasifikasi tanah maka perlu diketahui ukuran gradasi dari suatu tanah. Besaran butiran tanah dari hasil pengujian gradasi tanah menjadi dasar dalam menentukan klasifikasi tanah dalam pemberian simbol jenis tanah [13].

Klasifikasi tanah merupakan metode menetapkan jenis tanah yang dikelompokkan berdasarkan persamaan sifat atau dikelompokkan berdasarkan penggunaannya [14]. Parameter yang diperlukan dalam mengklasifikasi tanah adalah ukuran butiran tanah dan konsistensi tanah. Metode klasifikasi tanah dapat dilakukan dengan metode AASTHO dan USCS [15].

### **California Bearing Ratio (CBR)**

CBR yaitu perbandingan dari beban percobaan dengan beban standar dinyatakan dalam persen. Beban percobaan dibutuhkan sebesar 0.1” dan 0/2”. Beban standar diasumsikan sebagai beban yang ditahan batu pecah standar pada penetrasi 0.1” dan 0.2” [16]. CBR tanpa rendaman dipakai untuk mendapatkan nilai CBR pada saat kepadatan maksimum dengan nilai kadar air yang sudah ditentukan. CBR pada umumnya dipakai untuk merencanakan lapisan tebal perkerasan jalan dan juga untuk mengontrol kepadatan yang diperoleh [16].

### **Semen**

Material yang bersifat adhesive dan kohesif fungsinya sebagai perekat untuk mengikat fragmen mineral yang menjadikan satu kesatuan disebut semen [17]. *Portland* semen tergolong semen hidrolik yang didapatkan dari penghalusan klinker yaitu Silikat Kalsium yang ditambah Gypsum [17].

ASTM C125-11 menjelaskan bahwa *Portland* semen bahan penyusun utamanya adalah Kalsium Silikat Hidrat [18]. Campuran tanah dengan semen dapat meningkatkan periode waktu kekuatan dan perawatan sehingga konstruksi tidak menunggu waktu yang lama [8].

### **METODE**

Metode penelitian pengujian laboratorium untuk mendapatkan data yang akan dianalisis. Penelitian ini menggunakan bahan utama yaitu tanah ekspansif yang diperoleh dari daerah Kulim Kota Pekanbaru. Sampel tanah diuji sifat indeks propertis tanah asli. Semen menggunakan semen *Portland* tipe I yang dibeli pada salah satu toko bangunan di Kota Pekanbaru. Variasi semen yang digunakan adalah 10%, 12%, 14%, dan 16% dan variasi pukulan yaitu 10 kali, 25kali, dan 56 kali. Sampel tanah ekspansif dihancurkan kemudian diayak lolos # No. 4 pada kondisi kering oven. Sampel pengujian CBR tanah asli dan tanah stabilisasi semen dirawat selama 7 hari dengan menutup menggunakan plastik.

Jenis pengujian yang dilakukan di laboratorium yaitu:

1. Pengujian *Sieve Analysis* berdasarkan SNI3423: 2008.
2. Pengujian *Water Content* berdasarkan SNI1965: 2008.
3. Pengujian *Specific Gravity* berdasarkan SNI1964: 2008.
4. Pengujian *Atterberg limits* berdasarkan SNI1967: 2008.
5. Pengujian *proctor* berdasarkan SNI1743: 2008.
6. Pengujian CBR laboraorium berdasarkan SNI1744: 20212.

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Uji propertis tanah asli dilakukan di Laboratorium Program Studi Teknik Sipil. Hasil pengujian dari tanah asli dapat dilihat pada Tabel berikut:

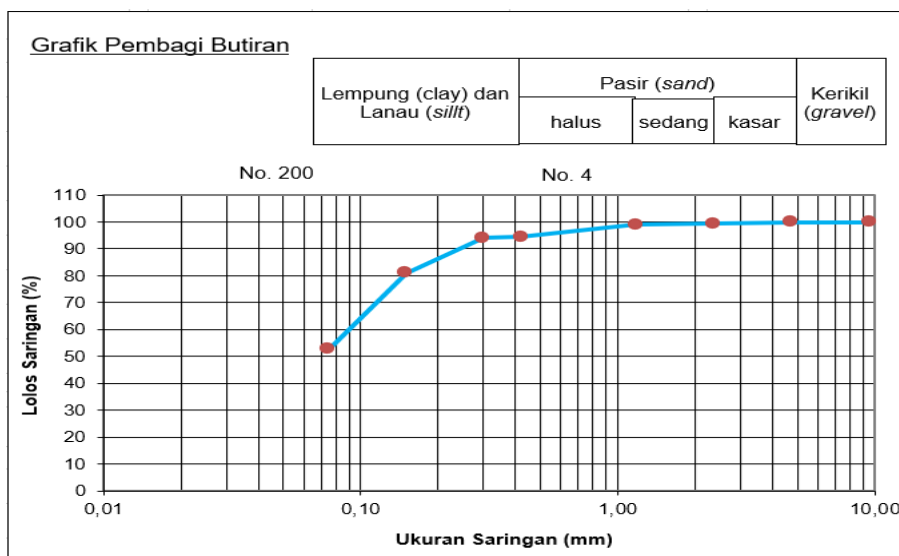
Tabel 2. Hasil Pengujian Tanah Asli

Pengujian Laboratorium	Satuan	Hasil
Berat jenis <i>GS</i>	%	2,661
<i>Water Content (w)</i>	%	34,12
<i>Liquid Limit</i>	%	58,29
<i>Plastisitas Limit</i>	%	34,91
<i>Plastisitas Indeks</i>	%	23,38
Cohesi	Kg/cm <sup>2</sup>	0,1928
Sudut Gesr	°	27,99
Woptimum	%	20,2
Berat isi kering maksimum	gr/cc	1,59
CBR	%	4,80

Hasil pengujian propertis tanah asli memperoleh nilai berat jenis tanah sebesar 2,661 tergolong pada jenis lempung organic [19]. Hasil pengujian *atterberg limit* diperoleh PI sebesar 23,38%, tergolong pada lempung plastisitas tinggi karena Indeks Plastistas > 17% [20]. Nilai CBR yang diperoleh sebesar 4,80%, nilai ini tergolong tanah daya dukung rendah karena nilai CBR < 6% [21]. Untuk mengidentifikasi kembang susut tanah lokasi pengujian berdasarkan pengujian *atterberg limit* berdasarkan Skempton 1953 maka nilai indeks plastisitas memiliki derajat pengembangan tinggi, karena berada nilainya diantara 23-32 [10].

**Klasifikasi Tanah Metode *Unified Soil Classification System***

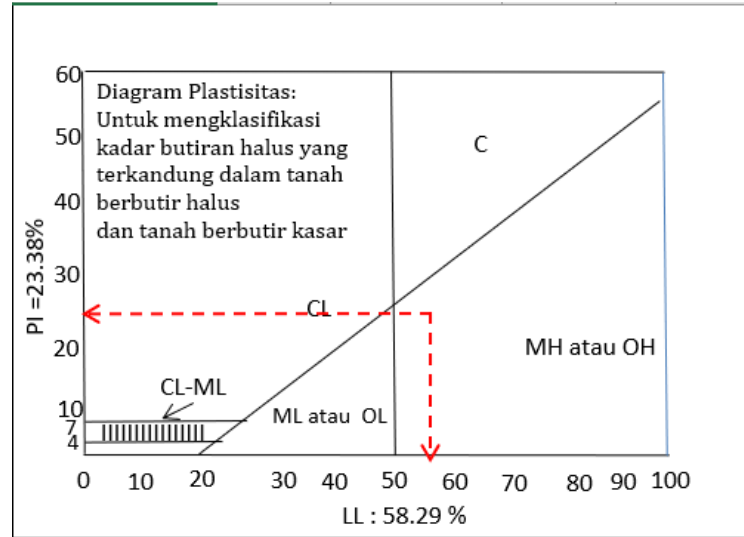
Tujuan dilakukan klasifikasi tanah untuk mengelompokkan tanah berdasarkan sifat yang diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium. Metode yang digunakan untuk klasifikasi tanah yaitu metode USCS. Parameter yang digunakan untuk klasifikasi dari tanah adalah Metode USCS dengan parameter yang diperlukana adalah nilai persen lolos saringan No.200 dan nilai batas cair dan indeks plastisitas. Pengujian analisa saringan disajikan Gambar berikut:



Gambar 1 Grafik pengujian *sieve analisis* tanah asli

Nilai persen lolos # No. 200 sebesar 52,69%, mengacu pada metode USCS maka tanah tergolong gradasi halus karena persen lolos # No. 200 > 50% [19].

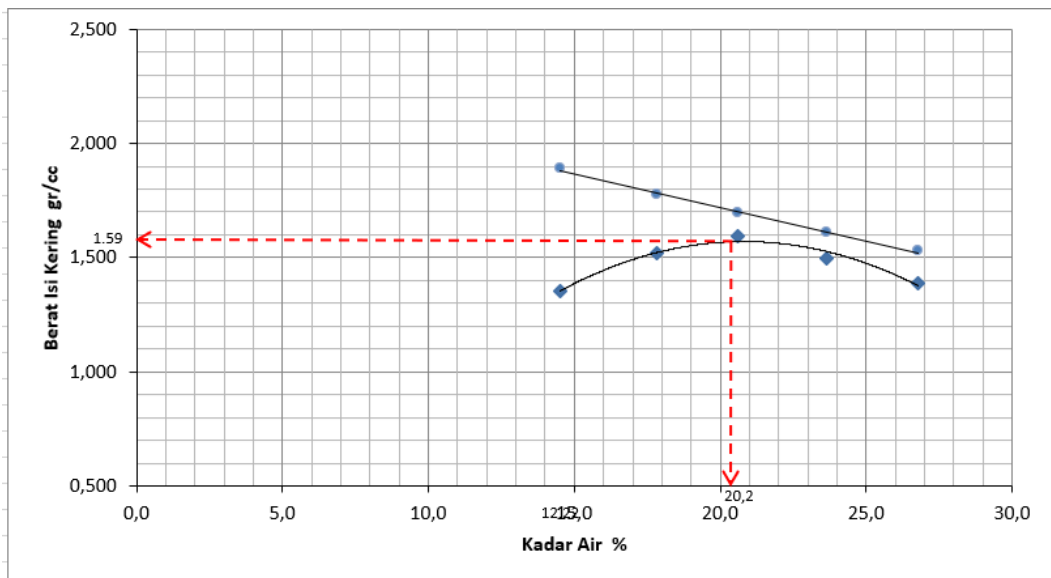
Berikut adalah Gambar kalsifikasi tanah USCS *method* :



**Gambar 2** Klasifikasi tanah asli USCS *method*

**Pengujian Pemadatan Laboratorium Tanah Asli**

Pengujian pemadatan di laboratorium disajikan Gambar berikut:

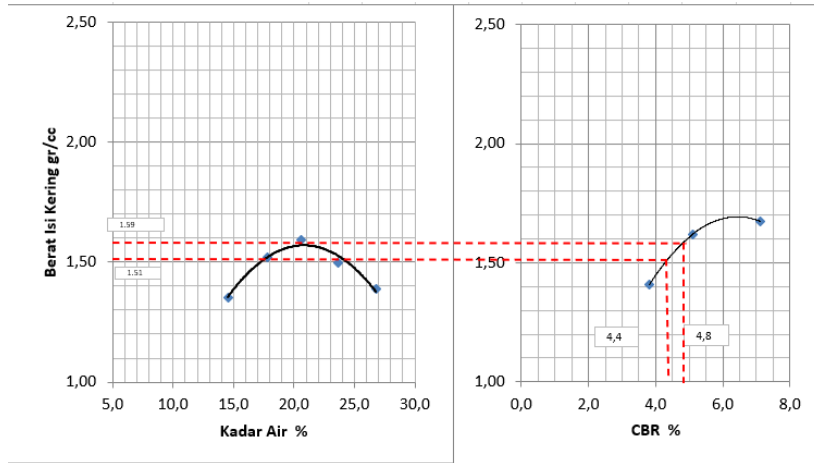


**Gambar 3** Grafik *proctor* tanah asli

Parameter yang dihasilkan dari pengujian pemadatan (*proctor*) adalah *the maximum dry weight value* (γ<sub>d</sub>maks) sebesar 1,59 Gr/cc. Untuk *optimum moisture content value* (W<sub>opt</sub>) yaitu 20,2%.

**Pengujian Nilai California Bearing Ratio (CBR)**

Pengujian CBR yang dilakukan di laboratorium, hasilnya dapat dilihat pada Gambar berikut:



**Gambar 4** Grafik CBR laboratorium tanah asli

Nilai CBR100% diperoleh dari berat isi kering maksimum pada saat pengujian pemdatan laboratorium (*Proctor*) sebesar 1,59 gr/cc, sehingga nilai CBR100% diperoleh adalah 4,8%. Untuk nilai CBR95% yaitu diperoleh dari nilai berat isi kering 95% x 1,59 = 1,51 gr/cc, sehingga nilai CBR95% diperoleh sebesar 4,4%. Nilai CBR yang diperoleh < 6% sehingga tanah tergolong pada daya dukung rendah [21].

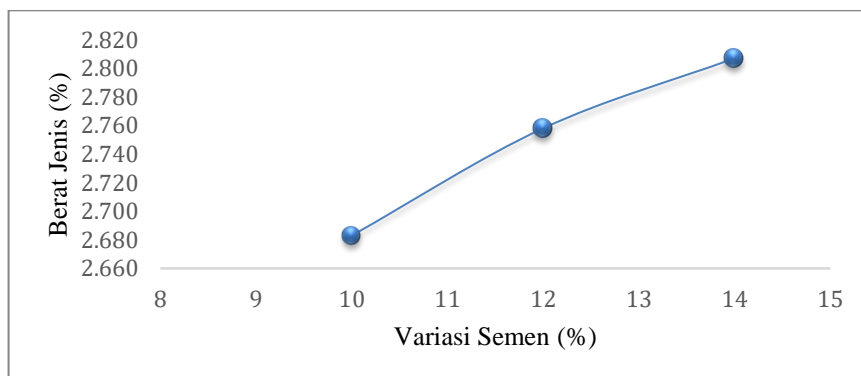
**Pengujian Berat Tanah Stabilisasi Semen**

Hasil pengujian berat jenis tanah stabilisasi semen masa waktu pemeraman 7 hari yaitu:

**Tabel 3.** Hasil Nilai Berat Jenis Stabilisasi Tanah dengan Semen

Kadar Semen (%)	Berat Jenis	Peningkatan (%)
0	2,661	-
10	2,683	0,022
12	2,758	0,097
14	2,807	0,146

Gambar hasil pengujian berat jenis tanah stabilisasi dengan semen disajikan Gambar berikut:



**Gambar 5** Berat jenis tanah stabilisasi dengan semen

Bertambahnya semen pada tanah lempung dapat meningkatkan kenaikan berat jenis tanah, hasil berat jenis maksimum pada penambahan 14% semen dengan nilai berat jenis tanah sebesar 2,807. Nilai peningkatan yang terjadi sebesar 0,146%.

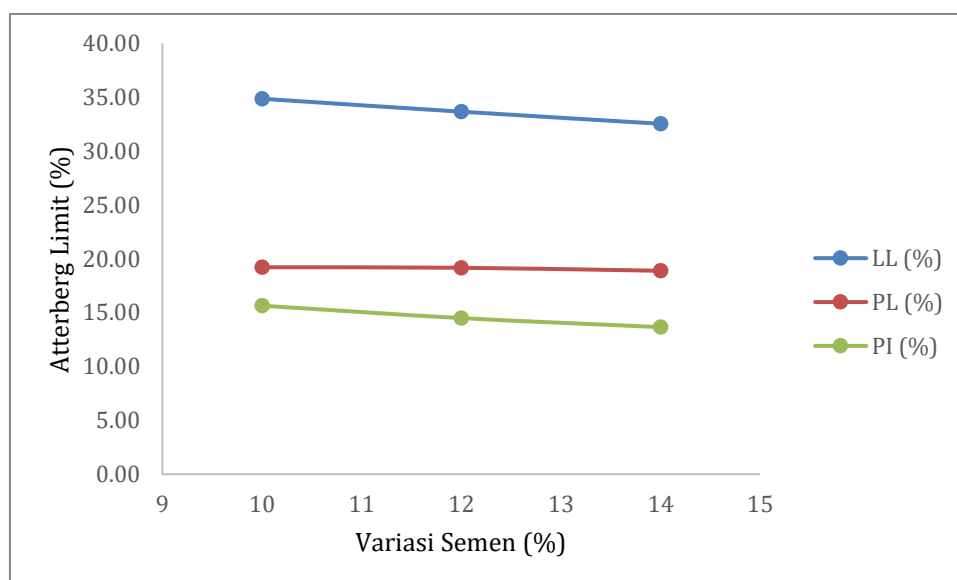
**Pengujian Atterberg Limits Tanah Stabilisasi Semen**

Pengujian *atterberg limits* tanah stabilisasi semen dengan lama pemeraman 7 hari dengan parameter yang dihasilkan yaitu LL, PL, dan PI. Hasil pengujian seperti pada Tabel berikut:

**Tabel 4.** Pengujian *Atterberg Limits* Tanah Stabilisasi

Kadar Semen (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
10	34,85	19,21	15,64
12	33,65	19,16	14,49
14	32,53	18,88	13,65

Gambar hasil pengujian *atterberg limits* tanah stabilisasi dengan semen disajikan Gambar berikut:



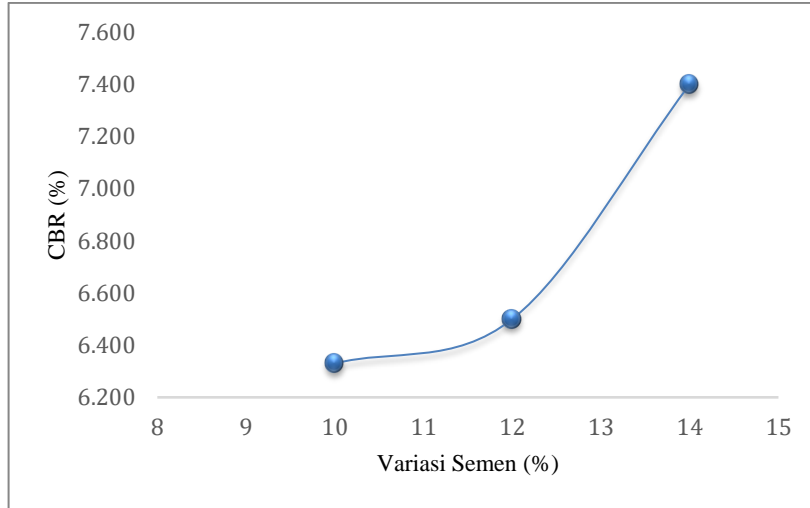
**Gambar 6** Grafik *atterberg limits*

Pada Gambar menunjukkan bahwa semakin banyak semen nilai PI semakin kecil yang berarti karakteristik tanah semakin baik [3]. Nilai PI terkecil pada variasi semen 14% yaitu sebesar 13,65%. Turun dari variasi 10% sebesar 15,64%, penurunan terjadi 1,99%.

**Pengujian CBR Tanah Stabilisasi Dengan Semen**

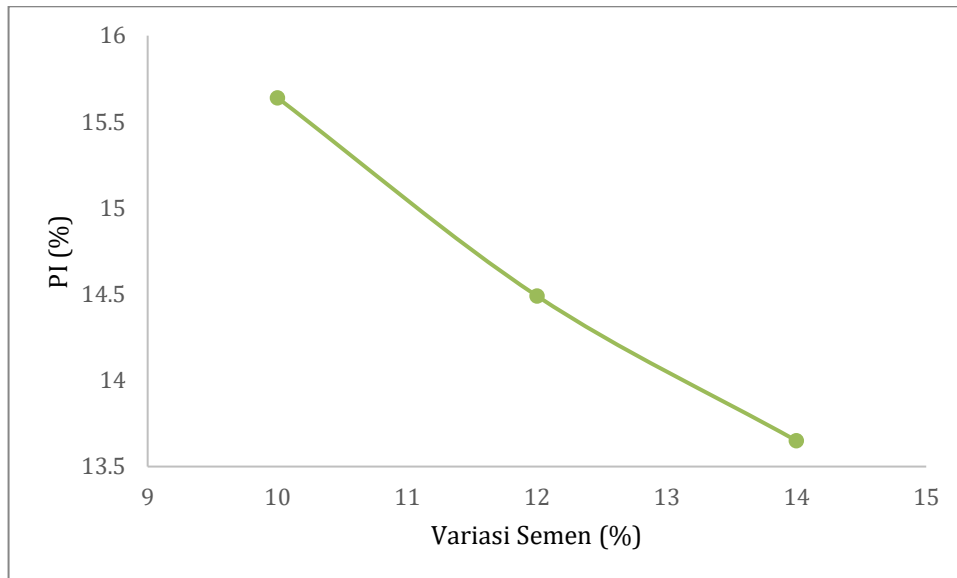
Pengujian CBR laboratorium menggunakan sampel CBR laboratorium dengan rendaman (*soaked*). Tanah yang digunakan pada pengujian ini adalah sampel tanah yang sudah kering dan lolos # No. 04 dan penambahan kadar air optimum dari pengujian *proctor*. Nilai CBR setelah stabilisasi tanah disajikan Gambar berikut:





**Gambar 7** Nilai CBR tanah stabilisasi semen

Terjadi peningkatan nilai CBR yaitu nilai CBR maksimum sebesar 7,40% pada variasi 14%. Berdasarkan nilai CBR yang telah diuji hasilnya memenuhi Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 > 6%. Stabilisasi tanah lempung dengan semen menaikkan nilai CBR, hal ini disebabkan semen mengandung silica yang akan mengikat air pada tanah lempung sehingga mengikat butiran tanah lempung [5]. Kandungan pada semen yaitu silica yang memiliki berat volume lebih besar dari butiran tanah asli, sehingga silica mengakibatkan meningkatkan berat volume kering akibat terikat pasta semen. Pengikatan hidrolis ini menyebabkan tanah lempung menjadi kaku dan mengeras sehingga meningkatkan nilai CBR [17]. Nilai Indeks Plastisitas (PI) tanah stabilisasi dengan lempung disajikan grafik berikut:



**Gambar 8.** Gambar Indeks Plastisitas tanah stabilisasi dengan semen

Terjadi penurunan nilai Indeks Plastisitas (PI) dimana nilai PI berdasarkan korelasi tingkat keaktifan dengan potensi pengembangan berdasarkan Sempton 1953, dari awal tinggi menjadi

medium setelah distabilisasi dengan semen. Nilai PI berada diantar 12 -23, nilai PI pada variasi semen 14% sebesar 13,65% [10].

## SIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini yaitu *engineering* propertis tanah dengan stabilisasi semen meningkatkan nilai CBR tanah. Nilai CBR meningkat pada variasi 14% semen, nilai CBR memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu > 6%. Terjadi penurunan nilai Indeks Plastisitas (PI) dan nilai PI tergolong derajat pengembangan medium.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kami ucapkan pada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Lancang Kuning dan Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning, yang telah memberi support pada penelitian ini serta tim laboran yang telah membantu penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Barman and S. K. Dash, "Stabilization of Expansive Soils Using Chemical Additives: A review," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 1319–1342, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>.
- [2] A. Sorsa, "Engineering Properties of Cement Stabilized Expansive Clay Soil," *Civ. Environ. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 332–339, 2022.
- [3] Pratikso, A. Rochim, R. Mudiyo, and A. Situmorang, "Stabilization of Expansive Soil with Lime, Fly Ash and Cement," *Int. J. Intell. Syst. Appl. Eng.*, vol. 11, no. 4s, pp. 491–497, 2023.
- [4] F. N. W, E. A. S, Y. Zaika, A. Munawir, and A. Rachmansyah, "Perbaikan Tanah Ekspansif Dengan Penambahan Serbuk Gypsum dan Abu Sekam Padi Untuk Mengurangi Kerusakan Struktur Perkerasan," *Rekayasa Sipil*, vol. 9, no. 3, pp. 1–6, 2015.
- [5] Mawardi, M. R. Razali, and O. Wijaya, "Nilai CBR Pada Stabilisasi Tanah Dengan Semen Jalan Budi Utomo Unib Depan," *J. Inersia*, vol. 8, no. 2, p. 67, 2016.
- [6] L. Sun, H. Zhao, H. Tu, and Y. Tian, "The Smart Road: Practice and Concept," *Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 436–437, 2018.
- [7] H. Hariyanto and S. Jatmiko, "Pengaruh Penggunaan Semen Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung Lunak Di Daerah Grobogan Purwodadi," *J. Ilm. Teknosains*, vol. 7, no. 1/Mei, pp. 44–51, 2021.
- [8] P. Takaendengan, M. S, J. . Ticoh, and SumampouwJ.R, "Pengaruh Stabilisasi Semen Terhadap Swelling Lempung Ekspnasif," *J. Sipil Statik*, vol. 1, no. 6, pp. 382–289, 2013.

- [9] E. Elendra and A. Prihatiningsih, "Analisis Tanah Ekspansif Dengan Perbaikan Semen Putih Dan Semen Hitam Menggunakan UCT," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 2, no. 3, p. 53, 2019.
- [10] N. S. Surjandari, N. Djarwanti, Y. M. Purwana, B. Setiawan, B. B. Prakosa, and S. N. Fitri, "Potensi Kembang Susut Tanah Ekspansif di Wilayah Solo Raya (Studi Kasus di Trucuk, Pedan, dan Nogosari)," *Matriks Tek. Sipil*, vol. 9, no. 4, p. 283, 2021.
- [11] M. Anggraini, V. T. Haris, and A. Saleh, "Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Abu Tandan Sawit dan Semen Terhadap Tingkat Kepadatan Tanah," *J. RACIC*, vol. 7, no. 1, pp. 44–54, 2022, [Online]. Available: <https://scholar.archive.org/work/324a7gurbrscfcdect7odt2mzq/access/wayback/http://jurnal.univrab.ac.id/index.php/racic/article/download/1423/897>.
- [12] Y. Amran and D. Kurniawan, "Perencanaan Dinding Penahan Tanah Sungai Way Batanghari Kota Metro Dengan Metode Revetment Retaining Wall," *Tapak*, vol. 6, no. 2, pp. 157–165, 2017.
- [13] Y. Yudhyantoro, A. Prayoga, J. T. Sipil, F. Teknik, and U. S. Kuala, "Analisis Perubahan Volume pada Timbunan Tanah Lempung Berdasarkan Nilai Batas Susut ( SNI 3422 : 2008 )," vol. 2, pp. 114–123, 2022.
- [14] M. Anggraini, A. Saleh, and V. T. Haris, "Karakteristik Sifat Fisis dan Mekanis Landfill Sebagai Subgrade," *J. RACIC*, vol. 7, no. 2, pp. 224–233, 2022.
- [15] Fathurrozi and F. Rezqi, "Sifat-sifat fisis dan Mekanis Tanah Timbunan Badan Jalan Kuala Kapuas," *J. Poros Tek.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–54, 2016.
- [16] M. Iqbal, S. A. Nugroho, and F. Fatnanta, "Pengaruh Kadar Lempung dan Kadar Air Pada Sisi Basah Terhadap Nilai CBR Pada Tanah Lempung Kepasiran (Sandy Clay)," *Jom FTEKNIK*, vol. 1, no. 2, pp. 1–12, 2014.
- [17] A. Tjakrakusuma, H. A. Maulana, and G. S. Budi, "Stabilisasi Tanah Merauke–Papua Dengan Menggunakan Semen," *J. Dimens. Pratama Tek. Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 9–16, 2019.
- [18] E. Hartono and G. P. Santoso, "Analisis CBR Tanah Clayshale Akibat Distabilisasi Semen," *Bull. Civ. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 49–54, 2021.
- [19] C. H. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2019.
- [20] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1*, Edisi-5. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2010.
- [21] B. Marga, "Spesifikasi umum 2018," *Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 02/SE/Db/2018*, vol. 16, no. Revisi 2, 2020.