

Pengaruh Gabungan Kepadatan, Kadar Air, Ketebalan Lapisan, dan Energi Kompaksi terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas (UCS) pada Tanah Lempung Plastisitas Tinggi

Soewignjo Agus Nugroho¹⁾, Ferry Fatnanta²⁾

^{1, 2)} Program S1, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, HR Subrantas KM 12 Pekanbaru

²⁾ Program S2, Jurusan Teknik Sipil, Univ. Riau, Hr Subrantas KM 12 Pekanbaru

Email: nugroho.sa@eng.unri.ac.id¹⁾, ferry.fatnanta@eng.unri.ac.id²⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v16i1.1306>

(Received: 21 July 2025 / Revised: 24 November 2025 / Accepted: 29 December 2025)

Abstrak

Tanah kohesif, khususnya lempung lunak dan lempung ekspansif, menimbulkan tantangan signifikan dalam proyek teknik sipil karena karakteristik geoteknik nya yang kurang baik. Kegagalan pada konstruksi sipil, seperti perkerasan jalan, sering terjadi akibat daya dukung tanah yang rendah yang diakibatkan oleh lempung plastisitas tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi faktor-faktor utama yang mempengaruhi nilai Unconfined Compression Strength (UCS) dan mengamati pola keruntuhan yang sesuai terutama di bawah kondisi pemadatan yang kurang seragam. Variabel utama yang di selidiki adalah kepadatan tanah (dikontrol oleh energi pemadatan), kadar air, dan ketebalan lapisan pemadatan (dikontrol oleh massa tanah per-lapisan). Kadar air divariasikan menjadi tiga kondisi: di bawah kadar air optimum (OMC), pada OMC, dan di atas OMC. Variasi ketebalan lapisan dirancang untuk mensimulasikan pemadatan lapangan yang non-seragam, diatur dengan mengontrol massa tanah pada setiap dari tiga lapisan yang dipadatkan. Hasil pengujian secara konsisten menunjukkan bahwa tanah yang dipadatkan pada nilai OMC menghasilkan nilai UCS tertinggi sebesar.... Lebih lanjut, variasi ketebalan lapisan menunjukkan bahwa semakin kecil massa tanah per lapisan (yang menghasilkan lapisan yang lebih tipis dan lebih padat), semakin besar pula nilai UCS yang dihasilkan. Peningkatan kekuatan ini disebabkan oleh distribusi energi pemadatan yang lebih merata di seluruh lapisan. Temuan paling penting dari studi ini adalah bahwa bidang keruntuhan paling kritis didominasi terlihat pada lapisan tengah sampel, terutama pada spesimen yang dipadatkan secara non-seragam. Hal ini mengindikasikan bahwa antar muka antara lapisan pemadatan yang tidak seragam berpotensi menjadi zona kelemahan yang memerlukan pertimbangan cermat dalam aplikasi konstruksi di lapangan.

Kata kunci: lempung plastisitas tinggi, kuat tekan bebas (UCS), energi pemadatan, kadar air, kepadatan non-seragam, ketebalan lapisan.

Abstract

Cohesive soils, especially soft clay and expansive clay, pose significant challenges in civil engineering projects due to their poor geotechnical characteristic, such as road pavement, often occurring due to low bearing capacity caused by high plasticity clay. This research aims to evaluate the main factors that influence the Unconfined Compression Strength (UCS) and observe the corresponding failure patterns, especially under uniform compaction conditions. The main variables studied are soil density (controlled by compaction energy), water content, and compaction layer thickness (controlled by soil mass per layer). The water content was varied into three conditions: below optimum moisture content (OMC), at OMC, and above OMC. Variations in layer thickness were designed to simulate non-uniform field compaction, arranged by controlling the soil mass of each of the three compacted layers. Consistent testing result show that soil compacted

at the OMC value produces the highest UCS value. Furthermore, variations in layer thickness indicate that the smaller the soil mass per layer (resulting in thinner and denser layers), the greater the resulting UCS value. The increase in strength is due to a more even distribution of compaction energy throughout the layers. the most important finding of this study is that most critical failure plane is dominantly observed in the middle layer of the sample, especially in specimens compacted non-uniformly, indicating that non-uniformly compacted layers have the potential to become weak zone that require careful consideration in field construction.

Keywords: high plasticity clay, unconfined compressive strength (UCS), compaction energy, water content, non-uniform compaction, layer thickness

1. Latar Belakang

Tanah lempung yang memiliki plastisitas tinggi dan potensi ekspansif merupakan masalah rekayasa geoteknik yang umum terjadi di seluruh dunia (Nugroho et al., 2021; Zulnasari et al., 2021) (Abdullah et al., 2017). karakteristik seperti kekuatan geser yang rendah, penurunan yang besar, dan perubahan volume yang signifikan akibat fluktuasi kadar air, seringkali menyebabkan kerusakan serius pada infrastruktur sipil, termasuk jalan (Raju, V.R. and Valluri, 2008), landasan pacu (Ni & Geng, 2022; Watabe & Noguchi, 2011), dan fondasi ringan (Satria et al., 2020). Di Indonesia, kerusakan pada perkerasan jalan sering dihubungkan dengan daya dukung tanah dasar yang tidak memadai, sebagian besar karena kandungan lempung ekspansif. Peningkatan daya dukung tanah dasar memerlukan proses pemadatan yang optimal. Pemadatan bertujuan untuk meningkatkan kepadatan kering dan secara bersamaan mengurangi volume rongga udara, sehingga meningkatkan kekuatan geser, mengurangi kompresibilitas, dan mengendalikan perubahan volume (Phanikumar & Ramanjaneya Raju, 2020). tiga faktor kunci yang mendominasi hasil pemadatan di lapangan dan laboratorium adalah kadar air, energi pemadatan, dan metode penempatan lapisan tanah.

Banyak penelitian telah mengkonfirmasi hubungan antara kadar air dan kepadatan (Asnur & Yunita, 2023; Ilmuddin, 2022), di mana kuat tekan bebas (UCS) akan mencapai puncaknya pada kadar air optimum (OMC) (Kusuma et al., 2017; Ludfian & Wibowo, 2017; Suroso et al., 2013). Selain itu, peningkatan energi pemadatan akan menghasilkan kepadatan kering maksimum (MDD) yang lebih tinggi dan OMC yang lebih rendah, yang secara langsung berkorelasi positif dengan peningkatan nilai UCS (Ali & Mohamed, 2017; Yamin et al., 2021). Meskipun demikian, sebagai besar penelitian laboratorium menggunakan metode pemadatan standar di mana massa tanah, energi, dan ketebalan lapisan diasumsikan seragam untuk mencapai kepadatan homogen. Kenyataannya, kondisi pemadatan di lapangan seringkali menghasilkan kepadatan yang tidak seragam (*non-uniformly density*) di antara lapisan yang berbeda akibat variasi pengawasan, tumpang tindih roda pemadat, dan variasi ketebalan material yang dihamparkan. Pengujian lapangan menunjukkan bahwa variasi kerapatan antar lapisan pemadatan dapat mencapai 55 hingga 10%.

Penelitian sebelumnya fokus pada pengaruh kadar air dan energi pemadatan terhadap UCS (Nugroho et al., 2020), tetapi sedikit sekali yang secara sistematis menguji dampak spesifik dari ketidakseragaman ketebalan lapisan (*non-uniform layers thickness*) dalam spesimen UCS yang dipadatkan. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk celah tersebut dengan: mengevaluasi secara kuantitatif pengaruh variasi massa tanah per lapisan (yang mensimulasikan variasi

ketebalan/kepadatan) terhadap nilai UCS pada kondisi kadar air yang berbeda (di bawah OMC, pada OMC, dan di atas OMC); menganalisis pola keruntuhan dan bidang geser utama (terutama pada lapisan atas, tengah, dan bawah) pada sampel yang dipadatkan secara non-seragam.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah analisis mendalam mengenai letak kritis keruntuhan (bidang geser paling lemah) dalam sampel tanah lempung yang dipadatkan secara non-seragam, memberikan wawasan yang krusial bagi peningkatan kontrol kualitas pemadatan di lapangan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan sampel tanah lempung yang diambil dari daerah Muara Fajar, Rumbai, Pekanbaru. Tanah yang digunakan diklasifikasikan berdasarkan pengujian properties indeks yang mengacu pada standard ASTM/SNI (Tabel 1). Pengujian pemadatan standard dilakukan untuk menentukan kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum yang menjadi basis data untuk penyiapan sampel berikutnya.

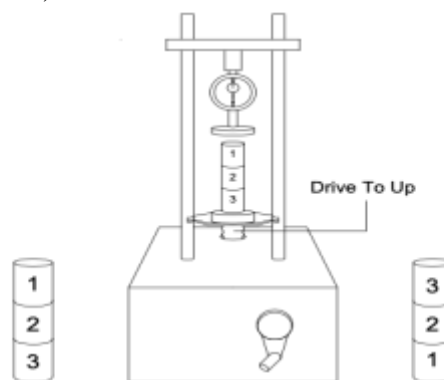
Tabel 1 Properties Indeks dan Klasifikasi Tanah

Properti	Satuan	Nilai	Standar Acuan
Berat jenis partikel (Gs)	-	2,64	ASTM D854; SNI 3422-2017
Batas Cair (Liquid Limit, LL)	%	68,77	ASTM D4318; SNI 3423-2008
Batas Plastis (Plastic Limit, PL)	%	31,75	ASTM D4318; SNI 3423-2008
Indeks Plastisitas, IP)	%	37,02	ASTM D4318; SNI 2423-2008
Klasifikasi Tanah (USCS)	-	CH	ASTM D2487; SNI 3424-2008
Kadar Air Optimum (OMC)	%	29,00	ASTM D698; SNI 1742-2008
Kepadatan kering Maksimum (MDD)	kN/m ³	13,70	ASTM D689; SNI 1742-2008
Energi pemadatan Standar (Ec)	kJ/m ³	593	

Sampel tanah disiapkan untuk pengujian *Unconfined Compression Strength* (UCS) (D2166: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, 2000) dengan dimensi spesimen diameter 50 mm dan tinggi 150 mm. total sampel sebanyak 122 buah

Kadar air tanah divariasikan menjadi tiga kondisi relatif terhadap OMC:

1. kondisi kering (dry side) : $w_1 = OMC - 2\%$
2. Optimum (Optimum Moisture content) : $w_2 = OMC$
3. kondisi basah (wet side) : $w_3 = OMC + 2\%$



a. lapisan terakhir berada di atas

b. lapisan pertama berada di atas

Gambar 1 Sketsa Pengujian Lapis Atas dan Bawah

Variasi kepadatan dan ketebalan lapisan (simulasi kondisi non-seragam) dicapai dengan mengontrol massa tanah untuk setiap lapisan pemadatan. setiap spesimen dipadatkan dalam tiga lapisan di dalam cetakan. Pengontrolan massa tanah per lapisan (Gambar 1) secara langsung menghasilkan perbedaan energi pemadatan spesifik per lapisan, sehingga mensimulasikan kondisi lapangan di mana ketebalan material yang dihamparkan tidak seragam.

Tabel 2 Matriks variasi Tanah per Lapisan pemadatan

Kode Sampel	kadar air	massa lapisan 1 (bawah)	massa lapisan 2 (tengah)	massa lapisan 3 (atas)
S-200-w	w ₁ , w ₂ , w ₃	200 gr	200 gr	200 gr
S-225-w	w ₁ , w ₂ , w ₃	225 gr	225 gr	225 gr
S-250-w	w ₁ , w ₂ , w ₃	250 gr	250 gr	250 gr
NS-1-w	w ₁ , w ₂ , w ₃	200 gr	225 gr	250 gr
NS-2-w	w ₁ , w ₂ , w ₃	250 gr	225 gr	200 gr
NS-3-w	w ₁ , w ₂ , w ₃	250 gr	200 gr	250 gr

Prosedur Pengujian Unconfined Compression Strength (UCS)

1. Pengambilan sampel: tanah dicampur dengan kadar air yang diinginkan dan didiamkan selama 24 jam untuk pemerataan kadar air (*curing*). sampel kemudian dicetak dalam cetakan diameter 50 mm, panjang 150 mm secara berlapis sesuai variasi massa pada Tabel 2. setiap lapisan dipadatkan dengan menggunakan hammer standard Proctor dengan variasi jumlah pukulan 8x dan 11x per lapis untuk mencapai kepadatan target.
2. penyimpanan (*curing*): setelah dicetak, sampel dikeluarkan dari cetakan dan disimpan dalam ruangan lembab untuk mempertahankan kadar air sampai saat pengujian
3. pengujian UCS: pengujian unconfined compression strength dilakukan sesuai dengan standar SNI 3638-2021 (ASTM D2166). beban diterapkan dengan kecepatan regangan aksial konstan sebesar 1% per menit hingga terjadi keruntuhan
4. pengujian dua sisi (pola keruntuhan): untuk setiap variasi sampel non-seragam (NS-1, NS-2, NS-3), pengujian UCS dilakukan dari dua arah untuk menganalisis lokasi keruntuhan terlemah:
 - a. pengujian sisi atas: beban diaplikasikan pada lapisan 3 (lapisan paling atas menuju lapisan 1 (lapisan bawah).
 - b. pengujian sisi bawah: spesimen dibalik, dan beban diaplikasikan pada lapisan 1 (lapisan paling bawah) menuju lapisan 3 (lapisan paling atas)
5. Perhitungan nilai *Unconfined Compression Strength* (q_u) dihitung menggunakan persamaan:

$$\sigma_a = \frac{P}{A'} \quad (1)$$

dimana σ_a adalah tegangan aksial tekan (UCS), P adalah beban aksial maksimum saat keruntuhan, dan A' adalah luas penampang terkoreksi.

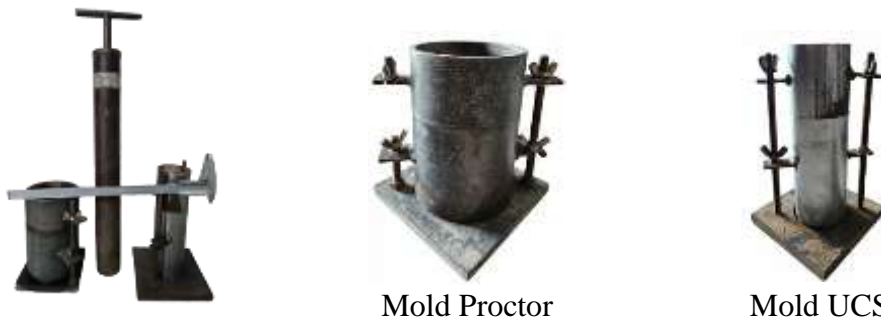
Energi standar (E_c) pada pengujian standard Proctor telah ditetapkan sebesar 12,375 lb. ft/ft³ (593 kJ/m³) mengikuti persamaan (2)

$$E_c = \frac{W_H * H_H * n_1 * n_2}{V_{mold}} \quad (2)$$

Persiapan sampel, untuk pengujian UCS, dilakukan dengan mencetak benda uji dalam tabung UCS dengan ukuran diameter 5,00 cm dan tinggi 15,00 cm. Dengan acuan standar energi kompaksi sama dan dimensi sampel yang berbeda, maka jumlah pukulan dengan energi setara dengan *Ec Standard Proctor* adalah sebanyak 7,79x (8) per lapis. Perbandingan hasil pengujian pematatan pada mold proctor dan mold UCS diberikan pada Tabel 3 dan Ukuran Mold disajikan pada Gambar 2.

Tabel 3 Perbandingan trial uji pematatan Mold Proctor vs mold UCS

Diskripsi	dia (cm)	tinggi (cm)	n ₁	n ₂	OMC (%)	MDD (kN/m ³)
Mold Proctor	10,16	11,64	3	25	29,00	13,90
Mold UCS	5,00	15,00	3	7	28,98	13,70
Mold UCS	5,00	15,00	3	8	28,99	13,85
Mold UCS	5,00	15,00	3	8	29,01	13,90



Mold Proctor
 Gambar 2 Dimensi Mold

Jumlah pukulan 8x per lapis pada mold UCS mendapatkan hasil OMC dan MDD setara dengan mold standard (mold standard Proctor). Kepadatan sampel tanah uji, divariasikan sebanyak 8x dan 11x tiap lapis; kadar air divariasikan 27,00%, 29,00%, dan 32,00%; dan variasi massa tanah lapisan 200gr, 225gr, dan 250gr.

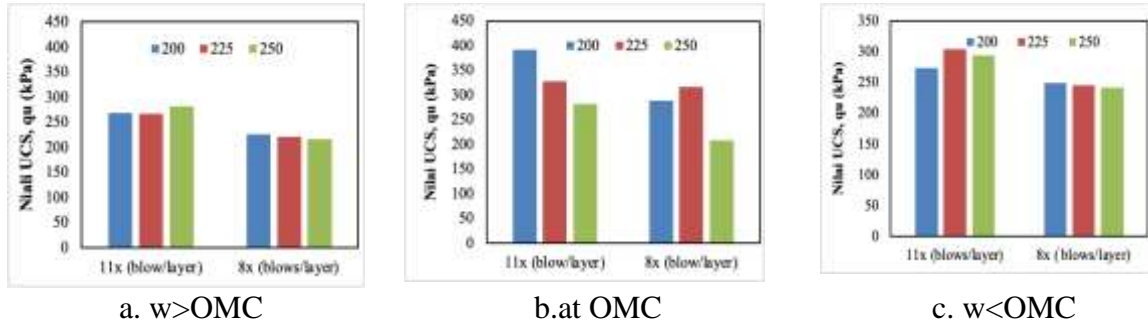
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hubungan Berat Tanah Tiap Lapisan dan Perubahan Kadar Air dengan Nilai Kuat Tekan bebas

Hasil yang telah didapat menunjukkan adanya perubahan nilai UCS terhadap perubahan berat tanah tiap lapisan. Pada pembahasan ini, pola keruntuhan di analisa dengan melakukan uji UCS pada sisi atas dan sisi bawah sampel tanah yang telah di padatkan. Variasi kadar air dipilih sisi basah (OMC+), pada OMC, dan sisi kering (OMC-) (S. A. Nugroho, G. Wibisono, 2013)

Hubungan antara variasi berat tanah tiap lapisan dan kadar air dengan nilai UCS dengan energi 8 pukulan dapat dilihat pada Gambar 3. Nilai q_u pada pematatan 8 pukulan tertinggi didapat pada kondisi OMC. Dimana nilai pada saat berat tiap lapisan 200 gr relatif lebih tinggi dibanding yang lainnya, baik pada pengujian sisi atas maupun sisi bawah. Hubungan antara variasi berat tanah tiap lapisan dan kadar air dengan nilai UCS pada sisi atas dengan energi 11 pukulan dapat dilihat pada Gambar 4. Hasil pengujian pada sisi atas menunjukkan bahwa penurunan nilai UCS terjadi seiring penambahan atau pengurangan kadar air dari OMC (Strength, 2015). Nilai UCS pada pengurangan kadar air sebesar 2% dari

OMC lebih tinggi dibandingkan dengan penambahan kadar air sebesar 3% dari OMC, di mana nilai q_u maksimal pada saat berat tanah tiap lapisan 200 gr, baik pada saat pengujian sisi atas maupun bawah. Hal ini dikarenakan perbandingan tebal lapisan pada berat tersebut lebih merata.



Gambar 3 Hubungan Nilai UCS dengan jumlah Pukulan

Nilai q_u dengan pemadatan 8 pukulan relatif lebih rendah dengan nilai q_u pada pemadatan 11 pukulan. Pada basah maupun kering nilai q_u mengalami penurunan dibanding kondisi OMC. Penambahan kadar air di atas OMC sebesar 3% menurunkan nilai UCS pada sampel tanah dan pengurangan kadar air di bawah OMC sebesar 2% juga menurunkan nilai UCS pada sampel tanah (Liu et al., 2021; Pezowicz & Choma-Moryl, 2015). Tabel 4 merupakan ringkasan hasil pengujian *Unconfined Compression Strength* berdasarkan variasi kadar air dan kepadatan seragam.

Tabel 4 Hasil Pengujian UCS pada kepadatan seragam

kondisi kadar air	jumlah pukulan	variasi massa tanah seragam	γ -dry rerata (kN/m ³)	rerata nilai UCS, q_u (kPa)
$w > OMC$ (dry side)	8	S-200, S-225, S-250	13,1	276,815
$w = OMC$ (optimum)	8	S-200, S-225, S-250	13,1	282,985
$w < OMC$ (wet side)	8	S-200, S-225, S-250	12,80	268,180
$w > OMC$ (dry side)	11	S-200, S-225, S-250	13,50	246,610
$w = OMC$ (optimum)	11	S-200, S-225, S-250	13,60	283,475
$w < OMC$ (wet side)	11	S-200, S-225, S-250	13,30	254,825

UCS mencapai nilai puncak pada OMC. pada kondisi $w < OMC$ (*dry side*), air tidak cukup bertindak sebagai pelumas untuk mengatur partikel, sehingga kepadatan cenderung lebih rendah. sebaliknya, pada kondisi $w > OMC$ (*wet side*), kelebihan air mengisi rongga pori, mengurangi kontak antar partikel, mengubah struktur tanah menjadi dispersi dan secara drastis mengurangi kekuatan geser efektif dan nilai UCS.

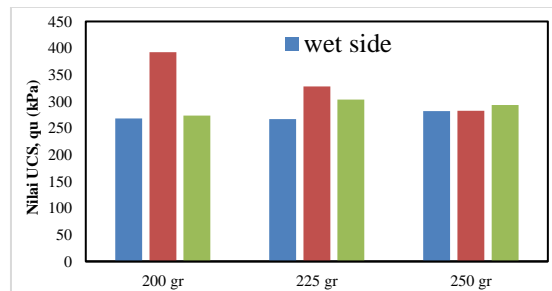
Pada setiap kadar air, nilai UCS harusnya menunjukkan korelasi positif dengan massa tanah per lapisan (S-200, S-225, dan S-250). ini membuktikan bahwa peningkatan energi pemadatan (yang diwakili oleh massa tanah yang lebih besar) meningkatkan kerapatan kering (γ_{dry}), yang pada akhirnya meningkatkan kekuatan tanah karena partikel tanah lebih rapat dan saling mengunci.

3.2 Pengaruh variasi ketebalan lapisan (Kepadatan non-seragam)

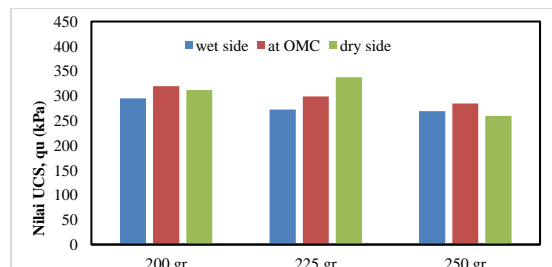
Nilai UCS antara sampel seragam (S-200, S-250) dengan sampel non-seragam (NS-1, NS-2, dan NS-3) pada kondisi OMC (sebagai kondisi kepadatan terbaik), ditampilkan dalam Tabel 5

Tabel 5 Perbandingan UCS pada kepadatan Seragam vs non-seragam

Kode sampel	massa lapisan (B ₁ /B ₂ /B ₃)	blows/l ayer	UCS rerata, qu (kPa)		Catatan
S-200	200/200/200	11	280,67	285,30	dasar (kontrol)
S-250	250/250/250	11	283,40	284,12	kepadatan tinggi (kontrol)
S-200	200/200/200	8	280,98	285,97	dasar (kontrol)
S-250	250/250/250	8	280,14	285,23	kepadatan tinggi (kontrol)
NS-1	200/225/250	11	276,24	322,86	kepadatan meningkat
NS-2	250/225/200	11	218,87	402,56	kepadatan menurun
NS-3	250/200/250	11	231,60	232,28	lapisan tengah terlemah
NS-1	200/225/250	8	177,89	303,29	kepadatan meningkat
NS-2	250/225/200	8	228,63	251,15	kepadatan menurun
NS-3	250/200/250	8	240,77	195,82	lapisan tengah terlemah



Gambar 4 Hubungan massa tanah per lapisan vs kadar air, uji sisi atas

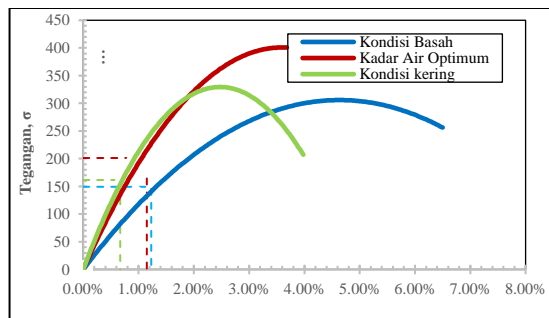


Gambar 5 Hubungan massa tanah per lapisan vs kadar air, uji sisi bawah

Sampel NS-3 (250/200/250) kemungkinan memiliki nilai UCS terendah di antar semua variasi non-seragam, karena adanya lapisan 2 (200 gr) yang sangat lemah dan menjadi bidang geser kritis. bandingkan nilai qu sampel NS-3 dengan UCS sampel seragam S-200. Kuantifikasi peningkatan/penurunan secara persentase penurunan UCS pada sampel NS-3 terhadap sampel S-250, menunjukkan bahwa ketidakseragaman pemadatan dapat menyebabkan penurunan keseluruhan (UCS) yang signifikan meskipun sebagian besar sampel (lapisan 1 dan 3) dipadatkan pada energi tinggi. Pada implikasi teknik sipil dengan praktik di lapangan, membuktikan bahwa jika material ditumpuk terlalu tebal atau jika pengawasan pemadatan tidak memastikan ketebalan lapisan dan jumlah pukulan yang seragam, maka lapisan tengah akan menjadi lapisan paling lemah, yang mendominasi kegagalan struktur.

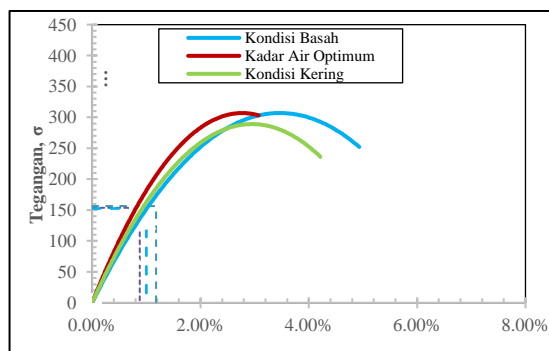
3.3 Hubungan Elastisitas (E), Kadar air, dan Density

Modulus elastisitas pada tanah lempung berubah seiring dengan berubahnya kadar air. Perubahan kadar air juga mempengaruhi kepadatan tanah yang diketahui berdasarkan kepadatan tanah. Perbedaan modulus elastisitas pada tanah lempung dengan berbagai variasi kadar air. Pada kondisi kadar air di atas OMC (basah) grafik perbandingan antara tegangan dan regangan memiliki nilai modulus elastisitas lebih rendah dibanding kondisi kering atau kadar air optimum. Hal ini menunjukkan tanah pada kondisi basah lebih elastis dibanding kondisi kering tetapi nilai kuat tekan bebasnya lebih rendah.



Gambar 6 Hubungan σ - ϵ pada pukulan 8x per layer

Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat perbedaan modulus elastisitas pada tanah lempung dengan berbagai variasi kadar air. Pada kondisi kadar air di atas OMC (basah) grafik perbandingan antara tegangan dan regangan memiliki nilai modulus elastisitas lebih rendah dibanding kondisi kering atau kadar air optimum. Hal ini menunjukkan tanah pada kondisi basah lebih elastis dibanding kondisi kering tetapi nilai kuat tekan bebasnya lebih rendah. Modulus elastisitas pada tanah lempung berubah seiring dengan berubahnya kadar air. Perubahan kadar air juga mempengaruhi kepadatan tanah yang diketahui berdasarkan kepadatan tanah. Analisa modulus elastisitas dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Hubungan σ - ϵ pada pukulan 11x per layer

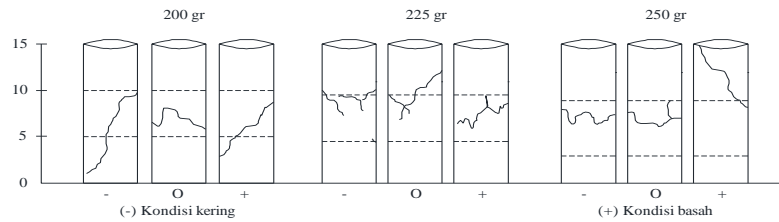
Tabel 6 Modulus Elastisitas pada Pemadatan dengan Berat 200 gr

blows	kadar air (%)	qu (kPa)	s (kPa)	e (%)	E (kPa)	dry density (kN/m ³)
8	27,00	263,32	131,658	0,862	15273,58	13,10
	29,00	276,05	138,023	0,651	21201,74	13,10
	32,00	233,34	116,669	0,921	12667,66	12,80

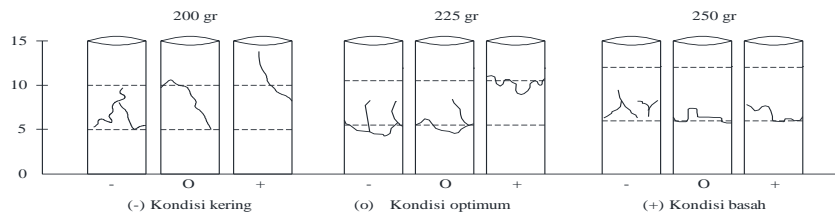
	27,00	323,16	161,578	0,669	24152,19	13,50
11	29,00	402,56	201,279	1,150	17502,53	13,60
	32,00	298,61	149,306	1,230	12138,71	13,30

3.4 Bentuk Keruntuhan Pada Pengujian Uji tekan Bebas

Analisis bentuk keruntuhan pada pengujian uji tekan bebas dilakukan dengan mengamati sketsa bentuk keruntuhan benda uji. Bentuk keruntuhan yang terjadi sangat bervariasi pada setiap benda uji. Untuk analisis bentuk keruntuhan pengujian uji tekan bebas dapat dilihat Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8 Bentuk bidang runtuh dengan lapis-3 bagian atas



Gambar 9 Bentuk bidan runtuh dengan lapis-1 bagian atas

Pada variasi berat tiap lapisan 200 gram, keruntuhan lebih bersifat fleksibel, di mana garis keruntuhan berbentuk diagonal dan menyentuh hampir setiap lapisan pemadatan. Dengan distribusi tebal lapisan pemadatan yang merata, bidang runtuh terjadi pada setiap lapisan pemadatan. Garis keruntuhan pada variasi pemadatan 8 dan 11 pukulan cenderung sama pada sampel dengan berat setiap lapisan 200 gr. sampel seragam cenderung mengalami keruntuhan geser diagonal 45^0 yang ideal (keruntuhan geser murni), mengindikasikan material yang homogen (Gambar 10).



a. wet side (8x per layer) b. at OMC (8x per layer) c. dry side (8x per layer)

Gambar 10 Bentuk keruntuhan sampel seragam

Pola keruntuhan sampel non-seragam (NS-3): ini adalah poin terpenting. Sampel non seragam, keruntuhan tidak lagi murni geser diagonal, tetapi di dominasi oleh bidang geser horisontal atau diagonal yang terpusat di sekitar antar muka atau lapisan 2, lapisan tengah, yang paling lemah (Gambar 11a).

Terlepas dari apakah beban diterapkan dari atas (Gambar 11b) atau bawah (Gambar 11c), lapisan dengan kepadatan terendah adalah sampel yang dikendalikan oleh lapisan terlemah nya (prinsip *weakest link*)



Gambar 11 Bentuk keruntuhan sampel non-seragam

Tabel yang menghubungkan kepadatan kering aktual (γ_{dry} aktual setiap variasi) terhadap nilai UCS (Tabel 3), membuktikan bahwa UCS adalah fungsi langsung dari γ_{dry} , terlepas dari apakah γ_{dry} dicapai melalui pemadatan seragam atau non-seragam. Sisi basah vs sisi kering, pola keruntuhan berbeda pada sisi basah dan sisi kering. Pada sisi kering, tegangan kapiler membantu menjaga Integritas sebaliknya pada sisi basah, partikel terdispersi dan lebih rentan terhadap keruntuhan tiba-tiba.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Hasil pengujian dari berat tanah tiap lapisan menunjukkan bahwa semakin sedikit berat tanah tiap lapisan maka nilai q_u semakin meningkat. Semakin besar berat tanah tiap lapisan nilai q_u semakin menurun. Hal ini disebabkan karena komposisi berat pada masing-masing lapisan terbagi secara merata. Selain itu pada proses pengujian sampel tanah sisa menjadi lebih sedikit. Tanah dengan kondisi kadar air pada nilai OMC memiliki nilai q_u yang lebih besar. Kandungan air di atas OMC menurunkan nilai q_u pada tanah. Begitu pula kadar air di bawah OMC menurunkan nilai q_u pada tanah. Nilai q_u pada sisi kering lebih besar dibandingkan dengan sisi basah. Hasil pengujian kepadatan menunjukkan nilai berat volume kering tertinggi didapat pada OMC dengan energi pemadatan 11 pukulan sebesar $1,37 \text{ gr/cm}^3$, berat volume kering terendah didapat pada kadar air di atas OMC dengan energi pemadatan 8 Pukulan sebesar $1,28 \text{ gr/cm}^3$. Bidang runtuh paling ekstrem terjadi pada lapisan kedua pada setiap variasi berat lapisan dengan pusat keruntuhan ditengah lapisan.

4.2 Saran

Perlu penelitian lebih lanjut tentang pengaruh kadar air, tebal lapisan, energi pemadatan dan kepadatan terhadap variasi konsistensi tanah kohesif. Berat tanah kering tiap lapisan sangat berkaitan dengan kadar air dan kepadatan/energi kepadatan. Sehingga perlu mix desain, dengan trial and error, agar tanah yang tidak ada yang terbuang karena melebihi tinggi rencana (berada dalam collar, sehingga harus dipotong). Pengujian kuat geser tanah dengan pengujian Triaksial UU (unconsolidated Undrained) dengan variasi derajat kejenuhan bisa dilakukan

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih pada Laboratorium Mekanika Tanah dan Batuan, Jurusan Teknik Sipil Unri atas support sarana dan prasarana selama penelitian berlangsung. terima kasih juga kepada Suratman atas bantuan olah data.

Daftar Pustaka

- Abdullah, H. H., Shahin, M. A., & Sarker, P. (2017, April). Stabilisation of Clay with Fly-Ash Geopolymer Incorporating GGBFS. GGBFS World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering. <https://doi.org/10.11159/icgre17.141>
- Ali, H., & Mohamed, M. (2017). The effects of compaction delay and environmental temperature on the mechanical and hydraulic properties of lime-stabilized extremely high plastic clays. *Applied Clay Science*, 150, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.09.019>
- Asnur, H., & Yunita, R. (2023). Perbandingan Tingkat Kepadatan Tanah Di Lima Kecamatan Kota Payakumbuh Dengan Metoda Standar Proktor. *SAINTEKES: Jurnal Sains, Teknologi Dan Kesehatan*, 2(1), 54–61. <https://doi.org/10.55681/saintekes.v2i1.21>
- D2166: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, USA (2000).
- Ilmuddin. (2022). Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Penambahan Pasir Terhadap Tingkat Kepadatan dan Daya Dukung Tanah di Dusun Lanang Desa Lampasio Kec. Lampasio. *Jurnal Sains Dan Teknologi Tadulako*, 8. <https://doi.org/10.22487/jstt.v8i1.379>
- Kusuma, R. I., Mina, E., & Utomo, A. P. (2017). Stabilisasi Tanah Menggunakan Fly Ash Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas Berdasarkan Variasi Kadar Air Optimum (Studi Kasus Jalan Raya Bojonegoro, Kab. Serang). *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 6(1).
- Liu, P., Lin, J., Wang, Y., & Yang, X. (2021). Effect of moisture content on the shear behaviour of a completely decomposed granite: An experimental study. *Advances in Civil Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6631422>
- Ludfian, M., & Wibowo, D. E. (2017). Stabilisasi Tana Lempung Menggunakan Campuran Limbah Abu Sekam Padi pada Pasir dengan Metode Pematatan Laboratorium. *INERSIA*, 13 (1), 66–75.
- Ni, J., & Geng, X.-Y. (2022). Radial consolidation of prefabricated vertical drain-reinforced soft clays under cyclic loading. *Transportation Geotechnics*, 37, 100840. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100840>
- Nugroho, S. A., Satibi, S., & Raflyatullah. (2021). Pengaruh Penggunaan Semen dan Fly Ash Terhadap Nili CBR Tanah Lempung Muara Fajar. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 17(3), 267–279.
- Nugroho, S. A., Wibisono, G., & Mauliza, A. Z. (2020). Studi Kandungan Kapur pada Stabilisasi Lempung Ekspansif dengan Pengujian UCS dalam Beberapa Kondisi. 41(1), 1–6. <https://doi.org/10.14710/teknik.v41n1.xxxxxx>

- Pezowicz, P., & Choma-Moryl, K. (2015). Moisture Content Impact on Mechanical Properties of Selected Cohesive Soils from the Wielkopolskie Voivodeship Southern Part. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37(4), 37–46. <https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0043>
- Phanikumar, B. R., & Ramanjaneya Raju, E. (2020). Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilised with lime sludge and cement. *Soils and Foundations*, 60(1), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.01.007>
- Raju, V.R. and Valluri, S. (2008). Practical Applications of Ground Improvement. *Proceeding of Symposium on Engineering of Ground & Environmental Geotechnique*.
- S. A. Nugroho, G. Wibisono, and F. K. (2013). Analisa Peningkatan Kekuatan Tanah Yang Diperkuat Serat dan Bahan Stabilisasi pada Sisi Kering dan Sisi Basah. *Jurnal Teknik Sipil (JTS-UAJY)*, 12(2), 137–144.
- Satria, Z., Fatnanta, F., & Nugroho, S. A. (2020). Pengaruh Waktu Terhadap Daya Dukung Fondasi Tiang Pada Tanah Lunak dengan Variasi Kekasaran. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 16(1), 12–24.
- Strength, C. (2015). Effect of Sodium Silicate-based liquid stabilizer on Unconfined Effect of Sodium Silicate-based liquid stabilizer on Unconfined Compressive Strength of Marine Clay. December 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.1743.6484>
- Suroso, S., Suyadi, W., Indrawahyuni, H., & Zaika, Y. (2013). Pengaruh Variasi Lama Perendaman, Energi Pematatan, dan Kadar Air Terhadap Pengembangan (Swelling) dan DDT Ekspansif di Kecamatan Paron, Kabupaten Ngawi. *Rekayasa Sipil*, 7(1), 55–65.
- Watabe, Y., & Noguchi, T. (2011). Site-Investigation and Geotechnical Design of D-Runway Construction in Tokyo Haneda Airport. *Soils and Foundations*, 51(6), 1003–1018. <https://doi.org/10.3208/sandf.51.1003>
- Yamin, M., Attom, M. F., Atabay, S., & Vandanapu, R. (2021). The effect of compaction effort on shear strength parameters of low/high plasticity clay Soils. *Geotechnical Engineering*, 52(2), 1–8.
- Zulnasari, A., Nugroho, S. A., & Fatnanta, F. (2021). Perubahan Nilai Kuat Tekan Lempung Lunak Distabilisasi Dengan Kapur dan Limbah Pembakaran Batubara. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 17(1), 24–36. <https://doi.org/10.25077/jrs.17.1.24-36.2021>