

## KUAT GESER TANAH LANAU-LEMPUNG DENGAN VARIASI DURASI KONTAMINASI LIMBAH OLI

Anto Budi Listawan<sup>1</sup>, Qunik Wiqoyah<sup>2</sup>, Renaningsih<sup>3</sup>, Agus Susanto<sup>4</sup>, Ridha Febriani<sup>5</sup>

<sup>12345</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura 57102 Telp 0271 717417

Email: Anto.Budi@ums.ac.id

### Abstrak

Limbah oli merupakan salah satu limbah yang perlu diperhatikan akhir-akhir ini. Pembuangan limbah oli sembarangan dapat membahayakan lingkungan. Salah satu yang terganggu akibat limbah oli ini adalah kekuatan tanah. Untuk mengetahui pengaruh dari limbah oli terhadap kekuatan tanah, maka dilakukan penelitian yang bertujuan untuk membandingkan kekuatan tanah, yaitu kuat geser tanah dengan parameter nilai kohesi ( $c$ ) dan sudut geser ( $\phi$ ) pada tanah asli dengan tanah yang sudah terkontaminasi limbah oli. Dengan menggunakan sampel tanah yang berasal dari Kecamatan Gantiwarno, Klaten dan untuk limbah oli diambil dari bengkel sepeda motor yang ada di Kartasura. Variasi yang dilakukan terletak pada durasi kontaminasi limbah oli yaitu  $\frac{1}{2}$  minggu, 1 minggu, dan 2 minggu di dalam alat pressurized fill tank. Dilakukan pengujian sifat fisis dan mekanis tanah, untuk sifat fisis terdiri dari uji kadar air, berat jenis, berat volume, batas-batas Atterberg, gradasi butiran dan klasifikasi tanah. Untuk sifat mekanis terdiri dari uji pemadatan menggunakan standart proctor dan uji kuat geser langsung (direct shear test). Berdasarkan hasil pengujian uji kuat geser langsung, didapatkan nilai kohesi yang selalu turun berturut-turut seiring lamanya durasi kontaminasi yaitu  $0.300 \text{ kg/cm}^2$ ,  $0.254 \text{ kg/cm}^2$ ,  $0.218 \text{ kg/cm}^2$ , dan  $0.195 \text{ kg/cm}^2$ . Berbanding terbalik dengan sudut gesek dalam yang nilainya semakin naik seiring bertambahnya durasi kontaminasi limbah oli yaitu  $25.560^\circ$ ,  $26.710^\circ$ ,  $27.209^\circ$ , dan  $29.032^\circ$ . Tegangan geser pada tiap variasi juga mengalami penurunan mulai dari beban terkecil hingga beban terbesar. Hal ini menunjukkan bahwa kuat geser tanah semakin menurun seiring dengan bertambahnya durasi kontaminasi limbah oli.

**Kata kunci:** limbah oli; kontaminasi; pressurized fill tank; kuat geser tanah; kohesi; sudut gesek dalam

### Pendahuluan

Limbah hasil industri merupakan salah satu masalah serius di era ini. Masalah limbah industri juga menjadi persoalan di industri kecil (1). Salah satu contohnya yaitu limbah oli. Oli merupakan salah satu dari berbagai pelumas yang digunakan untuk melumasi mesin pembakaran internal. Oli tidak dapat digunakan terus-menerus karena dapat menyebabkan penyumbatan pada bagian mesin. Maka dari itu harus dilakukan pergantian oli dalam jangka waktu tertentu. Oli kotor yang telah digunakan merupakan bentuk dari limbah oli (2). Sejalan dengan berkembangnya kota dan daerah, volume limbah oli semakin meningkat dikarenakan meningkatnya jumlah penggunaan kendaraan bermotor. Penyebaran limbah oli sudah sangat luas dari kota hingga desa dikarenakan usaha perbengkelan pastinya memiliki limbah oli bekas walaupun limbah yang dihasilkan memiliki jumlah yang berbeda. Padahal menurut Kementerian Lingkungan Hidup, oli bekas termasuk dalam limbah B3 atau limbah bahan berbahaya dan beracun yang dapat membahayakan makhluk hidup dan lingkungan (3).

Tanah merupakan hal yang paling berkaitan dengan masalah konstruksi suatu bangunan. Hal ini dikarenakan jenis, sifat, dan karakteristik tanah dapat menunjukkan kemampuan tanah dalam menahan bangunan di atasnya. Kemampuan tanah dalam menahan tekanan atau beban di atasnya disebut daya dukung tanah (4). Salah satu parameter untuk menganalisis daya dukung tanah yaitu kuat geser tanah. Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Ada beberapa cara untuk menentukan kuat geser tanah, salah satunya uji geser langsung (direct shear test). Dari pengujian ini akan didapatkan parameter kuat geser yaitu kohesi ( $C$ ) dan sudut geser ( $\phi$ ) (5).

Penelitian yang dilakukan menjelaskan pengaruh kontaminasi limbah oli bekas terhadap tanah lempung menggunakan parameter pengujian California Bearing Ratio (CBR) dan batas Atterberg menggunakan variasi persentase kandungan oli bekas terhadap berat sampel sebesar 3%, 6%, 9%, dan 12% (6). Dari hasil pengujian didapatkan hasil bahwa berat jenis dan batas plastis mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kandungan oli bekas dalam sampel. Nilai batas susut, berat volume kering, dan kadar air optimum tanah meningkat seiring dengan peningkatan kandungan oli namun mengalami penurunan pada persentase kandungan oli bekas 6%.

Kemudian hasil pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) menunjukkan nilainya menurun seiring meningkatnya kandungan oli bekas dalam sampel namun pada persentase kandungan oli bekas 9% nilainya meningkat dan setelahnya menurun kembali. Studi pengaruh limbah oli motor pada properti tanah lempung di Uyo-Akwa Ibom, Nigeria menggunakan parameter pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) dan batas Atterberg dengan menggunakan variasi pada kandungan oli bekas terhadap berat sampel yaitu sebesar 4%, 8%, 12%, dan 16%. Dari hasil penelitian yang dilakukan, didapatkan hasil bahwa semakin meningkat persentase kandungan oli bekas pada tanah di Uyo- Akwa Ibom menyebabkan kadar air optimum serta berat volume kering tanah hingga pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) tanah tersebut mengalami penurunan (2). Selanjutnya penelitian tentang pengaruh minyak mentah pada permeabilitas tanah dengan variasi kandungan oli bekas terhadap sampel yaitu sebesar 2%, 4%, 6%, dan 8% (7). Hasil penelitian menyimpulkan bahwa nilai permeabilitas semakin menurun seiring dengan meningkatnya kandungan oli bekas pada sampel. Studi pengaruh kontaminasi oli motor terhadap tanah liat yang terlalu terkonsolidasi, efek kontaminasi dan durasi kontaminasi dicapai dengan menyimpan sampel tanah di dalam tangki bertekanan yang diisi dengan oli motor di bawah tekanan sekitar 65 kPa (8). Parameternya adalah batas Atterberg, kuat tekan bebas, koefisien permeabilitas, dan karakteristik kompresibilitas. Hasil menunjukkan bahwa kuat tekan bebas berkurang sekitar 38% dibandingkan dengan tanah yang tidak terkontaminasi, penurunan berlangsung selama 6 bulan pertama, batas Atterberg menurun pada 3 bulan pertama, koefisien permeabilitas meningkat secara signifikan dan menunjukkan proporsi langsung dengan durasi kontaminasi hingga 3 bulan.

Untuk mengetahui nilai kuat geser tanah lanau-lempung akibat kontaminasi limbah oli, dilakukan dengan menganalisis nilai kohesi dan sudut gesek tanah dengan durasi waktu kontaminasi yang berbeda-beda yakni ½ minggu, 1 minggu, dan 2 minggu yang diberikan tekanan udara sebesar 65 kPa.

### Metode Pengujian

Tanah lempung yang digunakan diambil dari Dukuh Ngandong, Desa Bometan, Kecamatan Gantiwarno, Kabupaten Klaten, Jawa Tengah dengan kondisi terganggu (*disturbed*), pengambilan tanah pada kedalaman kurang lebih 40 cm dari permukaan tanah asli dan sampel dalam keadaan kering udara. Limbah oli bekas pakai kendaraan bermotor dari Bengkel Loso, Jalan Wimboharsono, Kartasura, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah. Penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan sebagai berikut:

Tahap I, merupakan tahap awal penelitian yang dimulai dengan studi literatur, menentukan lokasi pengambilan tanah lempung dan limbah oli, melakukan pengeringan tanah dan penyaringan tanah yang sudah dikeringkan dengan saringan nomor 4. Lokasi pengambilan tanah telah ditentukan yaitu daerah Klaten dengan kedalaman >40 cm dari permukaan tanah asli dan diambil dengan kondisi terganggu (*disturbed*). Untuk pengambilan limbah oli diambil di bengkel sepeda motor yang terletak di Kartasura. Tahap ini juga dilakukan persiapan untuk alat *pressurized fill tank* seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Alat *Pressurized Fill Tank*

Tahap II, melakukan uji sifat fisis tanah yang meliputi pengujian kadar air, berat jenis, berat volume, batas-batas Atterberg, *hydrometer*, dan analisa saringan. Setelah itu dilakukan pemadatan dengan *standar proctor*. Lalu untuk hasil pemadatan yang tidak terkontaminasi bisa langsung diambil sampel kuat geser dan diuji. Sedangkan untuk tanah terkontaminasi setelah dipadatkan langsung dikontaminasi buatan dengan limbah oli dalam alat *pressurized fill tank* dengan variasi durasi ½ minggu, 1 minggu, dan 2 minggu. Setelah dikontaminasi, tanah akan diambil sampel kuat geser langsung dan diuji.

Tahap III, berdasarkan hasil pengujian dari beberapa tahapan di atas didapatkan hasil uji fisis dan mekanis tanah yang telah terkontaminasi limbah oli, yang kemudian dilakukan analisis untuk membuat kesimpulan dan saran jika diperlukan pada penelitian yang telah dilakukan.

### Hasil dan Pembahasan

#### Sifat Fisis Tanah

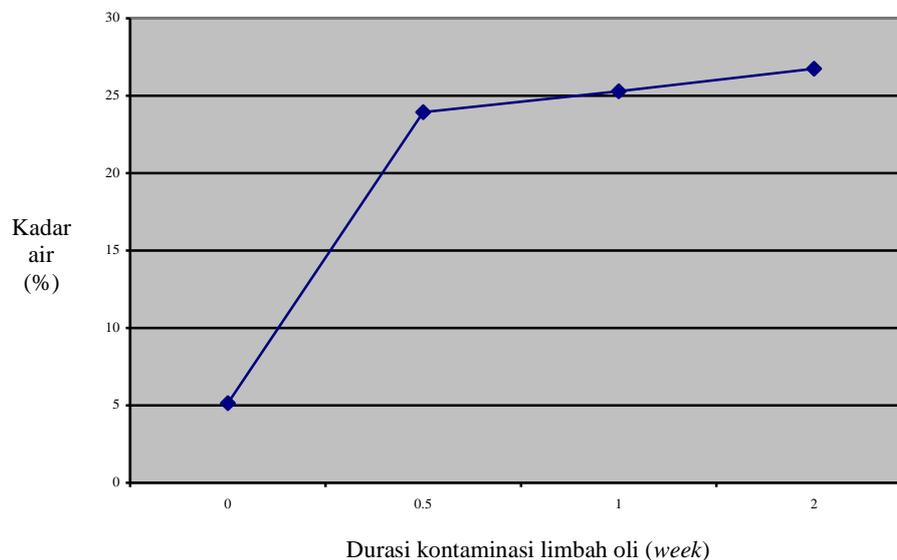
Pengujian sifat fisis dilakukan pada tanah asli, dan tanah kontaminasi limbah oli dengan durasi waktu ½ minggu, 1 minggu, dan 2 minggu. Pengujian sifat fisis terdiri dari kadar air, berat jenis, berat volume, batas-batas

Atterberg dan gradasi butiran. Hasil dari pengujian sifat fisis tanah asli dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian sifat fisis tanah asli dan tanah terkontaminasi

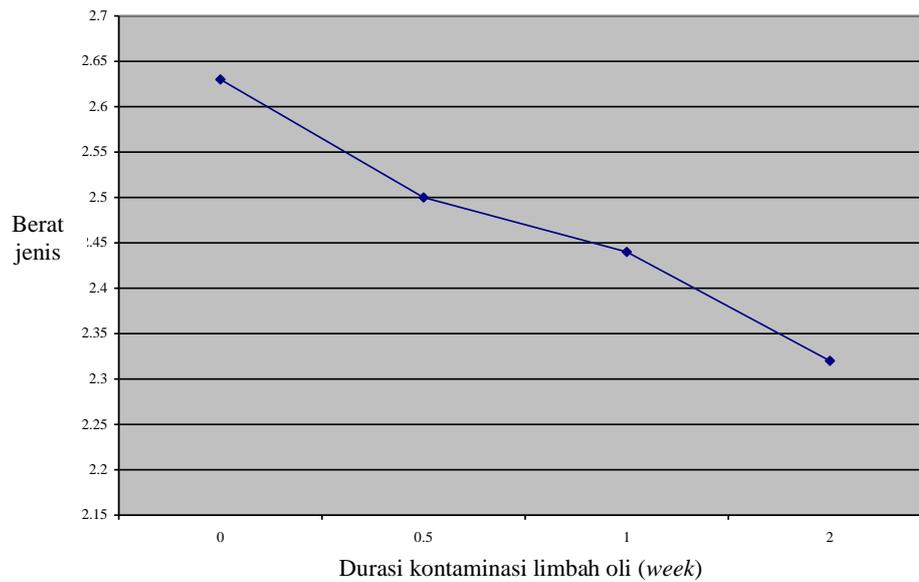
Jenis Pengujian	Durasi Waktu			
	Tanah Asli	1/2 minggu	1 minggu	2 minggu
Kadar Air (%)	5,14	23,94	25,29	26,74
Berat Jenis	2,63	2,50	2,44	2,32
Berat Volume (gr/cm <sup>3</sup> )	1,47	1,44	1,31	1,23
Batas Cair (LL) (%)	43,81	43,46	42,07	41,01
Batas Plastis (PL) (%)	32,63	32,48	29,67	27,89
Indeks Plastisitas (PI) (%)	11,18	10,98	12,40	13,12
Batas Susut (SL) (%)	17,70	12,41	10,17	9,91
Lolos Saringan No.200 (%)	73	70	65	60
Grup Indeks (GI)	9,01	8,14	7,51	6,40

Perbedaan yang sangat signifikan antara kadar air tanah asli dan tanah yang sudah terkontaminasi oli. Hal ini dikarenakan tanah yang terkontaminasi sudah diberikan penambahan air saat dilakukan pemadatan sebelum didiamkan di dalam limbah oli pada durasi yang sudah ditentukan. Dapat dilihat pula bahwa semakin lama waktu kontaminasi, semakin besar nilai kadar air yang didapat yaitu sebesar 26,74% pada durasi kontaminasi 2 minggu. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya oli yang merupakan zat cair meresap ke dalam tanah sehingga mempengaruhi nilai kadar air. Hubungan antara nilai kadar air dengan durasi waktu kontaminasi dapat dilihat pada gambar 2.



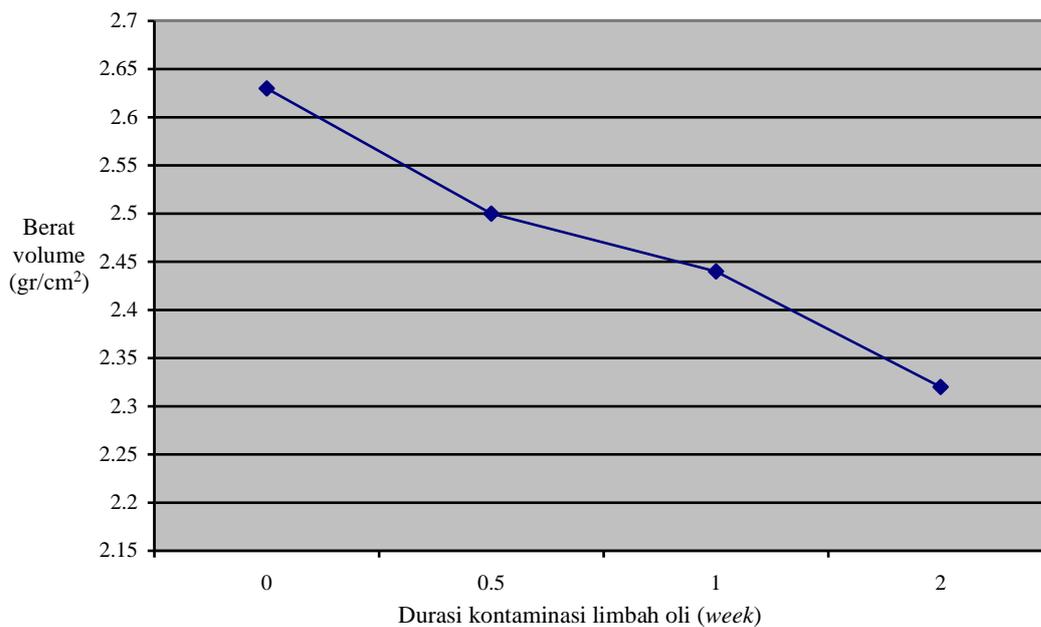
Gambar 2. Hubungan antara nilai kadar air dengan durasi waktu kontaminasi

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis, tanah asli masuk ke dalam tanah lanau anorganik karena memiliki nilai berat jenis sebesar 2,63. Nilai terkecil berat jenis ada pada durasi kontaminasi 2 minggu yaitu sebesar 2,32. Berat jenis dari oli yang mengontaminasi tanah sangat berpengaruh pada penurunan ini (6). Berat jenis oli yang lebih kecil dari berat jenis tanah yang menyebabkan penurunan nilai berat jenis antara tanah asli dan kontaminasi. Berat jenis oli memiliki nilai sebesar  $(0,875 \pm 4,637 \times 10^{-4})$  jika diuji menggunakan piknometer (9). Hubungan antara nilai berat jenis dengan durasi waktu kontaminasi dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Hubungan antara nilai Berat Jenis dengan durasi waktu kontaminasi

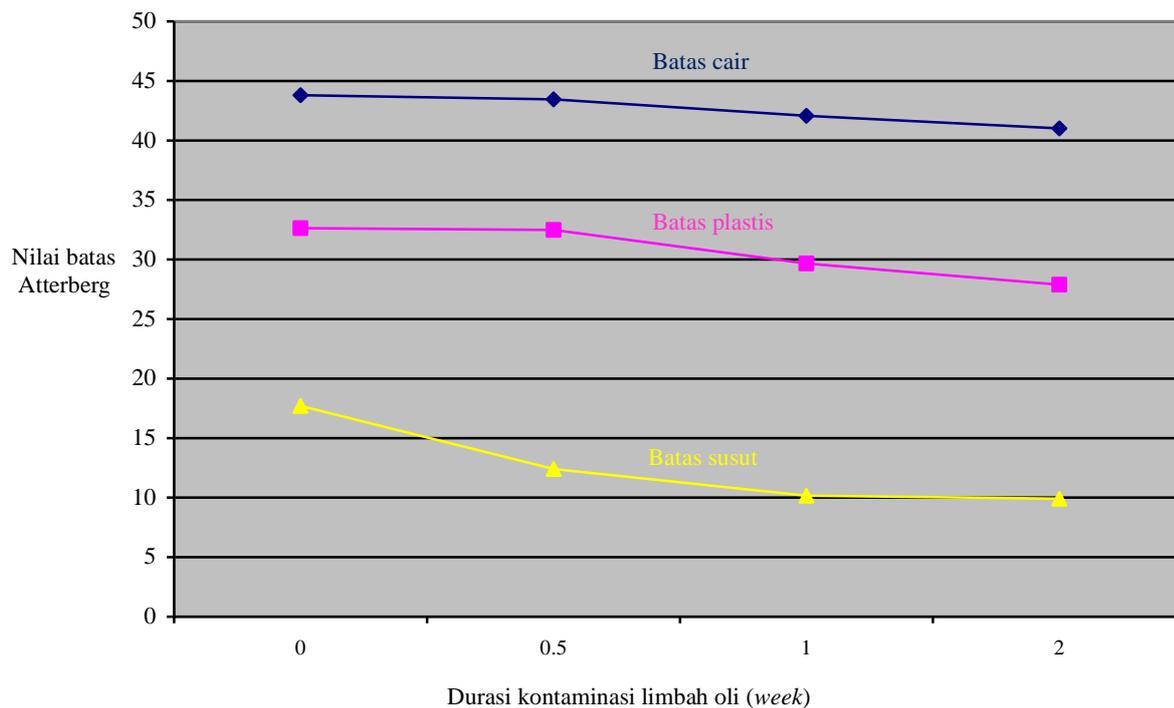
Dari hasil dapat dilihat nilai berat volume. Hal ini sangat sesuai dengan kandungan kadar air yang semakin naik nilainya seiring lamanya durasi kontaminasi tanah dengan limbah oli. Hubungan antara nilai berat volume dengan durasi waktu kontaminasi dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Hubungan antara berat volume dengan durasi waktu kontaminasi

Hasil dari semua pengujian batas-batas Atterberg menunjukkan adanya penurunan seiring dengan durasi waktu kontaminasi yang dilakukan. Nilai batas cair tertinggi terjadi pada tanah asli yaitu sebesar 43,81% sedangkan nilai yang terkecil terjadi pada tanah kontaminasi 2 minggu yaitu sebesar 41,01%. Begitu pula dengan nilai batas plastis dan batas susut. Hal ini terjadi dikarenakan tanah lempung tidak memiliki plastisitas jika dikontaminasikan dengan fluida non-polar. Oli merupakan fluida non-polar, sehingga hal ini yang menyebabkan penurunan dari nilai Atterberg (10). Hubungan antara nilai batas-batas Atterberg dengan durasi waktu kontaminasi dapat dilihat pada gambar 5.

Hasil nilai indeks plastisitas (PI) didapatkan dari pengurangan nilai batas cair (LL) dan batas plastis (PL). Kenaikan nilai indeks plastisitas (PI) dikarenakan penurunan nilai batas plastis yang signifikan daripada nilai batas cair (LL) seiring lamanya waktu durasi kontaminasi limbah oli. Nilai indeks plastisitas (PI) berada diantara 7-17. Hal ini menyatakan bahwa semua sampel tanah termasuk ke dalam tanah lempung berlanau dengan sifat plastisitas sedang dan kohesif.



Gambar 5. Hubungan antara nilai batas-batas Atterberg dengan durasi waktu kontaminasi

Hasil dari pengujian analisa saringan kontaminasi limbah oli menyebabkan penurunan pada persen lolos saringan nomor 200. Penurunan disebabkan karena butiran tanah setelah dikontaminasi dengan limbah oli menjadi butiran yang kasar, dan cenderung menggumpal sehingga butiran-butiran tidak mudah lepas dan dengan demikian yang dapat lolos saringan nomor 200 semakin menurun. Dilihat dari nilai GI menunjukkan hasil yang semakin menurun sesuai durasi waktu kontaminasi. Nilai GI terbesar didapat pada tanah asli sebesar 9,01. Untuk Nilai GI terendah yaitu pada kontaminasi 2 minggu sebesar 6,40. Menurut klasifikasi pada tabel AASHTO tanah asli termasuk dalam A-7-6 yang merupakan tanah berlempung dengan penilaian sedang atau sampai buruk sebagai tanah dasar. Kemudian berdasarkan klasifikasi USCS dengan tanah asli dan tanah kontaminasi termasuk kelompok ML-OL, karena berada di bawah garis A maka perlu dicari nilai LLR. Mencari nilai LLR yaitu dengan mencari nilai LL kering oven terlebih dahulu dan setelah didapatkan nilai tersebut kemudian dibagi dengan nilai LL. Dimasukkan ke dalam tabel klasifikasi USCS, tanah asli dan tanah kontaminasi termasuk kedalam kelompok ML yang merupakan tanah lanau anorganik berplastisitas rendah. Jadi klasifikasi untuk tanah asli dan tanah kontaminasi limbah oli mengalami persamaan baik menurut metode USCS atau AASHTO. Hal ini dikarenakan penurunan nilai sifat fisis tanah yang terjadi akibat kontaminasi limbah oli tidak terlalu signifikan.

#### Sifat Mekanis Tanah

Pengujian nilai kuat tekan geser dilakukan pada tanah asli dan tanah yang terkontaminasi limbah oli. Untuk tanah yang terkontaminasi oli memiliki 3 variasi durasi waktu yaitu ½ minggu, 1 minggu, dan 2 minggu. Hasil pengujian DST dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. hasil uji DST tanah asli dan tanah kontaminasi

No.	Jenis sampel	Nilai kohesi (C) (kg/cm <sup>2</sup> )	Sudut gesek ( $\phi$ )(°)
1	Tanah asli	0,300	25.560
2	Tanah kontaminasi 1/2 minggu	0,254	26.710
3	Tanah Kontaminasi 1 minggu	0,218	27.209
4	Tanah Kontaminasi 2 minggu	0,195	29.032

Pada pengujian tanah asli didapatkan nilai kohesi (C) sebesar 0.300 kg/cm<sup>2</sup> dan dapat disimpulkan bahwa tanah asli merupakan tanah lempung dengan konsistensi sedang. Nilai kohesi mengalami penurunan seiring dengan lamanya durasi kontaminasi limbah oli. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya oli yang meresap ke dalam tanah jika semakin lama dikontaminasi. Partikel tanah lempung mempunyai muatan listrik negatif (5). Ada 3 mekanisme yang menyebabkan suatu molekul dapat tertarik oleh permukaan partikel lempung secara elektrik, salah satunya merupakan molekul dipolar. Namun, pada penelitian lain molekul minyak mentah bersifat non-dipolar sehingga tidak dapat membentuk ikatan polar dengan permukaan partikel lempung (11). Hal ini dapat diartikan bahwa air dan minyak mentah tidak bisa bercampur. Karena hal ini pula, reaksi air dan permukaan tanah

lempung semakin berkurang. Maka gaya tarik-menarik antar partikelnya semakin kecil. Gaya tarik-menarik inilah yang menimbulkan sifat kohesif. Lempung murni kenyang air tidak memiliki nilai sudut geser dan hanya memiliki nilai kohesi saja (12). Namun, ada tanah *friction cohesive* yang terjadi antara kombinasi gesekan dan pelekatan. Pada tanah ini terdiri dari tanah berbutir kasar yang merupakan tempat terjadinya gesekan murni dengan tanah lempung yang merupakan tempat terjadinya pelekatan murni.

Sudut gesek dalam dipengaruhi oleh jenis tanah, kepadatan, bentuk butiran, dan ukuran butiran tanah. Tanah berbutir kasar hanya memiliki sudut gesek dalam dan tidak memiliki nilai kohesi (12). Dari hal ini dapat disimpulkan semakin besar nilai sudut gesek dalam maka semakin kasar butiran tanah tersebut. Hal ini dapat dibuktikan oleh nilai persen lolos saringan nomor 200 yang semakin kecil setiap pertambahan durasi kontaminasi.

Tegangan geser merupakan hal yang diperlukan untuk mengetahui kekuatan geser tanah dikarenakan secara umum kekuatan geser tanah merupakan kemampuan tanah melawan tegangan geser yang ada di dalam tanah (13). Wikipedia juga mengatakan bahwa kekuatan geser tanah dalam mekanika tanah menggambarkan besarnya tegangan geser yang dipertahankan oleh tanah. Duncan J.M. juga mengatakan sebagai tegangan geser maksimum yang dapat bertahan dari tanah (14). Maka dari itu dilakukan pengamatan nilai tegangan geser tiap variasi durasi waktu. Hasil tegangan geser pada beban normal 9 kg dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Tegangan Geser pada Beban Normal 9 kg

No.	Jenis Sampel	Tegangan Geser(kg/cm <sup>2</sup> )
1	Tanah asli	0.44
2	Tanah kontaminasi 1/2 minggu	0.40
3	Tanah Kontaminasi 1 minggu	0.37
4	Tanah Kontaminasi 2 minggu	0.37

### Kesimpulan

Dari hasil pengujian sifat fisis, dapat diambil kesimpulan bahwa semakin lama waktu durasi kontaminasi dengan limbah oli maka semakin naik pula kadar air pada tanah. Hal sebaliknya terjadi pada nilai berat jenis yang mengalami penurunan setiap bertambah lama waktu kontaminasi. Berat volume juga mengalami penurunan seiring bertambah waktu kontaminasi. Pada pengujian batas-batas Atterberg, nilai LL, PL, dan SL mengalami penurunan seiring lama durasi waktu kontaminasi. Pada pengujian gradasi butiran diperoleh bahwa nilai lolos saringan nomor 200 semakin berkurang seiring dengan lamanya kontaminasi yang menyatakan bahwa butiran tanah semakin kasar. Untuk klasifikasi tanah, tanah asli dan kontaminasi masuk ke dalam klasifikasi tanah yang sama yaitu A-7-6 untuk AASHTO dan ML untuk USCS. Tanah A-7-6 merupakan tanah lempung dengan penilaian sedang sampai buruk sebagai tanah dasar, sedangkan ML merupakan tanah lanau anorganik berplastisitas rendah.

Dari pengujian kuat geser langsung (*Direct Shear Test*) didapatkan kohesi, sudut gesek dalam, dan tegangan geser. Untuk nilai kohesi menunjukkan penurunan sedangkan sudut geser mengalami kenaikan seiring dengan lamanya durasi kontaminasi. Begitu pula dengan tegangan geser, nilainya selalu menurun seiring dengan lamanya waktu kontaminasi. Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa kuat geser tanah semakin berkurang seiring dengan penambahan waktu durasi kontaminasi limbah oli.

### Daftar Pustaka

- Nasir M, Saputro DEP, Handayani S. Manajemen Pengelolaan Limbah Industri. Vol. 19. 2015.
- Akpabio G. T., Udoinyang I. E., Basil T. S. Effect of Used Motor Oil Contamination on Geotechnical Properties of Clay Soil on Uyo-Akwa Ibom. Int J Nat Sci Res. 2017;5(2):22–30.
- Virlyaa Kala BagusP Pandu Winoto R. Karya Tulis Ilmiah Bidang IPA dan Lingkungan Daur Ulang Oli Bekas Menjadi Minyak dengan Destilasi. 2014.
- Tumewu DR, Riogilang H, Sarajar AN. Pemeriksaan Kekuatan Tanah Dengan Perkuatan Anyaman Kawat(Studi Kasus : Kawasan Tinoor). J Sipil Statik. 2016;4.
- Hardiyatmo H. mekanika-tanah-ii. 2002.
- Omasirichi Anele. Effect of Waste Engine Oil Contamination on Geotechnical Properties of Clay Soil. Eur Int J Sci Technol [Internet]. 2015;4(8). Available from: www.eijst.org.uk
- Iloeje A. Effect of Crude Oil on Permeability Properties of the Soil [Internet]. Vol. 1, International Journal of Trend in Scientific Research and Development. 2016. Available from: www.ijtsrd.com
- Nazir AK. Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. Alexandria Eng J. 2011;50(4):331–5.
- Gideon S, Tarigan ER. Penentuan Massa Jenis Oli secara Sederhana dengan Hukum Archimedes. Phys Educ Res J. 2020 Feb 29;2(1):43.
- Khamehchiyan M, Hossein Charkhabi A, Tajik M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. Eng Geol. 2007 Feb 6;89(3–4):220–9.
- Salimnezhad A, Soltani-Jigheh H, Soorki AA. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. J Rock Mech Geotech Eng. 2021 Jun 1;13(3):653–70.

12. Listyawan AB, Renaningsih, Wiqoyah Q, Susanto A. *Mekanika Tanah dan Rekayasa Pondasi*. Surakarta: Muhammadiyah University Press; 2017.
13. Darwis. *Dasar-Dasar Mekanika Tanah* [Internet]. 2018. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/323616697>
14. Duncan JM, Wright S.G. *Soil Strength and Slope Stability*. 2014.