ISSN 0853-2982 eISSN 2549-2659

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Studi Karakteristik Aliran Tanah Terlikuefaksi Berdasarkan Uji Viskositas

Wiwik Rahayu

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia
Email: wrahayu@eng.ui.ac.id

Widjojo Adi Prakoso

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia
Email: wprakoso@eng.ui.ac.id

Anisya Purwandari

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia
Email: anisya.purwandari@alumni.ui.ac.id

Dian Sih Pusporini (*)

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia
Email: diansihpusporini@gmail.com

Natasha Gilbert

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia
Email: natashagilbert56@gmail.com

Abstrak

Gempa bumi di Kota Palu sebesar 7,5 Mw pada tahun 2018 menyebabkan likuefaksi di Desa Lolu dengan pergerakan lateral tanah hingga 150 meter. Pergerakan ini terjadi akibat perilaku mencairnya tanah atau disebut likuefaksi. Beberapa peneliti telah membuktikan bahwa perilaku tanah terlikuefaksi dapat dianalisis dengan cara mensimulasikan tanah sebagai cairan yang memiliki kekentalan (viscous fluid). Perilaku pergerakan tanah pada saat likuefaksi terjadi dapat dipelajari melalui karakteristik aliran tanah. Karakteristik aliran tanah terlikuefaksi dianalisis dari nilai viskositas terhadap gaya yang diberikan. Dilakukan pengujian di laboratorium menggunakan alat rotational rheometer untuk mendapatkan nilai viskositas. Terdapat 6 (enam) sampel tanah uji yang digunakan pada penelitian ini, yaitu 3 (tiga) sampel dari area aliran dan 3 (tiga) sampel dari area terdampak. Tanah dari area aliran terdiri dari silty sand, coarse sand, dan fine sand. Sementara tanah dari area terdampak terdiri dari sand gravel, sand gravel boulder, dan silty sand. Seluruh sampel tanah uji menunjukkan karakteristik aliran tanah terlikuefaksi Non-Newtonian, yaitu shear thinning. Variasi kadar air dan suhu yang diterapkan pada seluruh sampel tanah uji menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai kadar air dan suhu, maka semakin rendah nilai viskositas yang dihasilkan. Berdasarkan komposisi tanah, semakin besar persentase butir halus yang terkandung maka semakin besar nilai viskositas atau dapat dikatakan tanah mengalir dengan lebih lambat.

Kata-kata Kunci: Likuefaksi, rotational rheometer, laju geser viskositas, kadar air suhu.

Abstract

An earthquake in Palu City of 7.5 Mw in 2018 caused liquefaction in Lolu Village with lateral ground movement up to 150 meters. This movement occurs due to the behavior of melting soil, called liquefaction. Several researchers have proven that the behavior of liquefied soil can be analyzed by simulating the soil as a viscous fluid. The behavior of soil movement when liquefaction occurs can be studied through the characteristics of soil flow. The characteristics of liquefied soil flow were analyzed, from the value of the viscosity due to the applied force. Laboratory tests were carried out using a rotational rheometer to obtain the viscosity value. There were 6 (six) soil samples used in this study, namely 3 (three) samples from the flow area and 3 (three) samples from the affected area. The soil of the flow area consists of silty sand, coarse sand, and fine sand. The soil from the affected area consists of sand gravel, sand gravel boulders, and silty sand. All of the tested soil samples showed non-Newtonian soil flow characteristics, namely shear thinning. Variations in water content and temperature applied to all tested soil samples indicate that the higher the water content and temperature values, the lower the resulting viscosity value. Based on the composition of the soil, the greater the percentage of fine grains contained, the greater the value of viscosity, or it can be said that the soil flows more slowly.

Keywords: Liquefaction, rotational rheometer, viscosity shear rate, temperature water content

***** *Penulis Korespondensi: diansihpusporini@gmail.com*

Diterima 6 September 2022, Direvisi 31 Maret 2023, Diterima untuk dipublikasikan 12 April 2023
Copyright © 2023 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2023.30.1.6

1. Pendahuluan

Fenomena likuefaksi pada Kota Palu dan Kabupaten Sigi terjadi setelah gempa dengan magnitudo Mw 7,5 pada tanggal 28 September 2018 mengguncang daerah tersebut. Gempa ini terjadi pada sesar geser Palu- Koro yang berarah utara-selatan, memanjang melalui Kota Palu dan wilayah lainnya di Provinsi Sulawesi Tengah, Indonesia. Gempa ini juga menyebabkan gelombang tsunami pada wilayah Teluk Palu, Sulawesi Tengah. Likuefaksi terjadi ketika getaran gempa memicu kenaikan tekanan air pori pada tanah sehingga tegangan efektif berkurang. Berkurangnya tegangan efektif ini membuat tanah kehilangan kekakuan dan berubah seakan – akan seperti cairan (Das, 1992). Dampak likuefaksi yang terjadi di Desa Lolu antara lain kerusakan seluas 0,22 km^2 dan sepanjang 750-meter dari jalan utama ke batas luncuran dan berakhir di tepi barat longsoran (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2018). Selain perpindahan material secara horizontal, likuefaksi juga biasa ditandai dengan ditemukannya sand boil di permukaan yang ditemukan di beberapa titik di lapangan.

Setiap lapisan tanah memiliki properi tanah yang berbeda-beda sehingga memiliki permeabilitas yang berbeda pula. Perbedaan ini menciptakan peluang cairan untuk berpindah menuju lokasi yang mudah ditembus atau bertekanan lebih rendah. Pada proses perpindahan cairan ini, terdapat kemungkinan cairan untuk terperangkap di bawah tanah dengan permeabilitas kecil (Yang & Elgamal, 2001). *Sand boil* akan terbentuk ketika air yang terperangkap lolos ke permukaan dan mendorong lapisan pasir atau material ringan lain yang berada di atasnya. Besarnya perpindahan tanah saat likuefaksi terjadi akibat perilaku tanah yang berada pada fase cair ketika tekanan air pori meningkat. Pada fase cair ini, partikel tanah tidak mendukung satu sama lain, sehingga kehilangan kekuatan dan kekakuannya. Teori ini membutuhkan klarifikasi terhadap karakteristik aliran tanah terlikuefaksi. Beberapa peneliti terdahulu telah melakukan studi untuk menentukan karakteristik tanah terlikuefaksi dengan memperlakukan tanah terlikuefaksi sebagai *viscous fluid* atau cairan yang memiliki kekentalan (Hwang et al., 2005).

Selain besar magnitude gempa, karakteristik aliran tanah terlikuefaksi juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti suhu dan kadar air tanah pada waktu terjadi peristiwa tersebut. Kondisi suhu di tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah iklim, cuaca, karakteristik tanah, dan kondisi topografi (Budhyastoro et al., 2013). Berdasarkan kedalaman, semakin dalam tanah maka suhu akan semakin netral dan konstan berbeda dengan suhu di permukaan yang sangat terpengaruh oleh suhu udara. Perbedaan jenis tanah juga menghasilkan konduktivitas termal yang berbeda. Faktor yang mempengaruhi besar konduktivitas termal antara lain, kadar air, berat jenis, serta tipe mineral dan material organik yang terkandung (Lilliestierna & Utas, 2015).

Viskositas merupakan gesekan internal antar molekul pada cairan yang terjadi saat cairan mengalir. Gradien dari kecepatam aliran disebut sebagai shear rate atau laju geser, sedangkan gaya per unit area yang dihasilkan dari aliran cairan disebut shear stress atau tegangan geser (Barnes, 2000). Properti atau karakteristik tanah terlikuefaksi dapat diketahui dengan menganalisis nilai viskositas tanah terhadap laju geser yang didapatkan dari hasil eksperimen laboratorium menggunakan berbagai macam metode. Analisis ini dilakukan berdasarkan prinsip mekanika fluida, sebagai salah satu cabang ilmu fisika yang mempelajari deformasi dan aliran materi. Karakteristik aliran dapat dijelaskan melalui kurva dari laju geser dan tegangan geser yang disebut sebagai kurva aliran (Hasanzadeh, 2017). Karakteristik aliran terbagi menjadi 2 (dua) jenis, yaitu carian Newtonian dan cairan Non – Newtonian. Cairan Newtonian mengikuti hukum Newton dimana tegangan geser bertambah seiring bertambahnya laju geser dengan gradien yang konstan. Cairan Non–Newtonian menunjukkan karakteristik yang tidak sesuai dengan hukum Newton sehingga viskositas dapat bertambah (shear thickening) ataupun berkurang (shear thinning) seiring meningkatnya laju geser (Malvern Instruments Limited, 2016).

Beberapa faktor selain sifat dasar dari cairan, dapat mempengaruhi nilai viskositas dari cairan tersebut. Salah satunya adalah suhu. Sebagian besar cairan memiliki viskositas yang berbanding terbalik dengan kenaikan suhu. Namun pengujian faktor suhu terhadap likuefaksi tanah masih terbatas. Beberapa contoh penelitian mengenai faktor suhu pada uji viskositas antara lain, penelitian (Lumbantoruan & Yulianti, 2016) yang meneliti pengaruh suhu pada oli, (Husin & Hussain, 2012) yang meneliti pengaruh suhu pada *crude oil*, dan (Ishida et al., 2007) yang meneliti pengaruh suhu pada air. Ketiga penelitian tersebut menyimpulkan bahwa viskositas cairan menurun seiring dengan bertambahnya suhu.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran tanah terlikuefaksi yang terjadi di Desa Lolu. Studi viskositas tanah dilakukan melalui penelitian di laboratorium menggunakan alat rheometer rotasi. Hasil analisis hubungan antara laju geser dengan viskositas atau laju geser dengan tegangan geser dapat digunakan untuk menentukan karakteristik aliran tanah terlikuefaksi. Sebagai tambahan, untuk mengetahui pengaruh faktor luar selama likuefaksi terjadi yang dapat mempengaruhi karakteristik aliran, maka dilakukan variasi pada nilai kadar air dan suhu dalam penelitian. Pada penelitian ini, pengaruh komposisi butiran tanah dan perbedaan area likuefaksi (area aliran dan area terdampak) juga dianalisis terhadap nilai viskositas tanah terlikuefaksi.

2. Metode

Berdasarkan penelitian tentang karakteristik aliran tanah terlikuefaksi oleh Jae-Ik Hwang pada tahun 2005, didapatkan hasil bahwa tanah terlikuefaksi berperilaku seperti cairan Non – Newtonian. Nilai viskositas menurun dengan bertambahnya laju geser (Hwang et al., 2005). Selain itu berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Yumin Chen, viskositas tanah terlikuefaksi menurun dengan bertambahnya laju geser.

Diterima 6 September 2022, Direvisi 31 Maret 2023, Diterima untuk dipublikasikan 12 April 2023
Copyright ⓒ 2023 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2023.30.1.6

Gambar 1. Rotational rheometer, rheolab QC, Anton Paar

Hal ini menunjukkan perilaku cairan Non – Newtonian, yaitu shear thinning (Chen et al., 2013).

Berdasarkan teori rheologi, viskositas adalah sifat zat cair yang merupakan ukuran ketahanannya terhadap aliran. Sehingga cairan dengan viskositas tinggi mengalir perlahan sedangkan cairan dengan viskositas rendah mengalir lebih cepat. Viskositas tanah terlikuefaksi diuji menggunakan alat rheometer rotasi. Rheometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur cara cairan mengalir sebagai respon terhadap gaya yang diterapkan, yaitu dengan mengukur viskositas.

Berdasarkan teori rheologi, viskositas adalah sifat zat cair yang merupakan ukuran ketahanannya terhadap aliran. Cairan dengan viskositas tinggi mengalir perlahan sedangkan cairan dengan viskositas rendah mengalir lebih cepat. Studi viskositas tanah banyak dilakukan pada tanah yang bergerak, seperti pada fenomena longsor dan likuefaksi. Pada penelitian ini, viskositas tanah terlikuefaksi diuji menggunakan alat rheometer rotasi. Rheometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur cara cairan mengalir sebagai respon terhadap gaya yang diterapkan, yaitu dengan mengukur viskositas. Rheometer rotasi bekerja berdasarkan prinsip Searle. Pada prinsip ini, motor menghasilkan torsi yang diperlukan untuk memutar *spindle* pengukur ("Rotational Rheometer Methods," 2012). Torsi ini bekerja terhadap *viscous force* sampel dan mengkonversikannya menjadi nilai viskositas sampel. Rheometer rotasi bekerja menggunakan sistem pengukuran *coaxial cylinder* atau *concentric cylinder*. Pengukuran ini diterapkan jika celah antar wadah silinder dan *spindle* silinder sempit, yang mengacu pada ISO 3219:1993.

Pengujian dilakukan untuk mengetahui faktor komposisi butir tanah, kadar air, dan suhu terhadap karakteristik aliran tanah terlikuefaksi. Pada saat pengujian, sampel tanah dicampurkan dengan air menggunakan rasio kadar air yang sudah melewati batas cair. Setelah dicampurkan dengan air dan dibuat homogen maka sampel campuran tersebut dimasukkan ke cawan silinder. Pada pengujian dengan variasi kadar air, sampel tanah dipersiapkan dengan menentukan berat tanah dan berat air untuk mencapai kadar air tertentu. Sementara pada pengujian dengan variasi suhu, dilakukan pemanasan menggunakan *temperature device* yang terpasang pada alat. Nilai suhu yang diinginkan dimasukkan pada komputer yang telah tersambung. Selain itu juga dilakukan pengecekan menggunakan thermometer digital.

Caawn silinder akan dipasang pada alat rheometer rotasi. Sebelum alat dijalankan dan dilakukan pembacaan viskositas, perlu dilakukan pengaturan terhadap variasi laju geser pada sistem yang terhubung dengan alat uji. Saat alat dijalankan, *spindle* akan memutar sampel tanah sesuai dengan laju geser yang telah diatur dan proses pembacaan viskositas akan langsung tercatat dalam sistem. Hasil pengujian yang tersaji pada sistem berupa grafik hubungan antara laju geser dengan viskositas.

Material padat dan cair memiliki perbedaan pada reaksi jika material tersebut dikenakan tegangan akibat gravitasi pada periode waktu yang singkat. Maka dari itu, jika benda uji dikenakan tekanan pada rentang yang luas dan periode waktu yang berbeda, material padat dapat diobservasi dengan pendekatan material cair, begitu pula sebaliknya (Tsugawa et al., 2019).

Contohnya adalah tanah padat yang dapat berperilaku sebagai cairan ketika terjadi aliran tanah longsor. Hal tersebut dapat terjadi ketika tanah dikenakan tekanan pada rentang yang luas dari kecil hingga besar dan pada periode waktu yang tidak normal. Perilaku viskositas dan elastisitas dapat bersamaan terjadi bergantung pada besar dan durasi laju tegangan atau laju tekanan dimana fenomena ini disebut *viscoelasticity* (Tsugawa et al., 2019).

Pada penelitian ini, nilai laju geser ditetapkan sebagai variabel bebas saat pengujian viskositas tanah terlikuefaksi. Nilai laju geser yang diberikan pada sampel dimulai dari 1 s^{-1} hingga 100 s^{-1}. Namun dalam menganalisis viskositas tanah terlikuefaksi, digunakan rentang laju geser 1 s^{-1} hingga 30 s^{-1}, dimana pada rentang tersebut karakteristik aliran tanah terlikuefaksi lebih terlihat perbedaannya. Suhu yang digunakan pada saat pengujian adalah suhu kamar, yaitu 25°C. Namun pada analisis pengaruh suhu terhadap nilai viskositas, digunakan variasi suhu 25°C dan 35°C. Pada alat uji digunakan spindle dengan jenis cyclone cylinder spindle No. 27. Untuk mendapatkan nilai viskositas, dilakukan pembagian antara tegangan geser yang bekerja pada cairan dengan laju geser yang diberikan. Tegangan geser dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{F}{Rb}\left(\frac{1}{2\pi RbL}\right) \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{1}{2\pi Rb^2 L} \tag{3}$$

Berikut adalah keterangan dari rumus di atas:

σ = Tegangan geser [Pa atau N/m^2]
$\dot{\gamma}$ = Laju geser [s^{-1}]
η = Viskositas [Pa.s]

Diterima 6 September 2022, Direvisi 31 Maret 2023, Diterima untuk dipublikasikan 12 April 2023
Copyright ⓒ 2023 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2023.30.1.6

Tabel 1. Klasifikasi tanah berdasarkan USCS

Lokasi Pengambilan Sampel	Jenis Tanah Berdasarkan Pengamatan Visual dan Perabaan Tangan	Simbol	Klasifikasi Tanah Menurut USCS
Flow Area	*Silty Sand*	FSS	SP-SM
Flow Area	*Coarse Sand*	FCS	SP
Flow Area	*Fine Sand*	FFS	SP
Affected Area	*Sand Gravel*	ASG	SP
Affected Area	*Sand Gravel Boulder*	ASGB	SP
Affected Area	*Silty Sand*	ASS	SP-SM

Tabel 2. Properti fisik sampel tanah uji

Properti Fisik Sampel	FSS	FCS	FFS	ASG	ASGB	ASS
Berat Jenis, Gs	2,63	2,64	2,67	2,62	2,64	2,66
Koefisien Kelengkungan,Cc	0,83	0,95	1,23	0,84	0,67	1,24
Koefisien Keseragaman,Cu	2,76	3,31	4,44	4,42	5,25	5,27

Adapun sampel yang digunakan adalah sampel tanah dari Desa Lolu yang diambil 6 (enam) bulan setelah likuefaksi terjadi. Tanah diambil berdasarkan observasi *trenching* dimana observasi dilakukan melalui pengamatan mata dan perabaan tangan untuk selanjutnya tanah dipetakan berdasarkan lokasi dan jenisnya (Harninto & Prakoso, 2020). Sampel tanah terbagi menjadi 2 (dua) berdasarkan area likuifaksi, yaitu area aliran dengan perpindahan material tanah saat likuefaksi mencapai 10 hingga 153-meter dan area terdampak dengan perpindahan material kurang dari 10-meter.

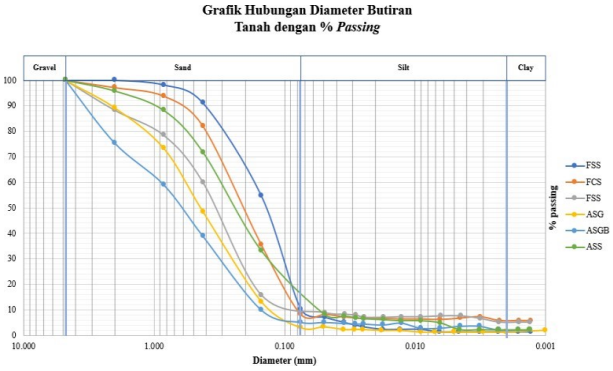
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Uji indeks properti tanah

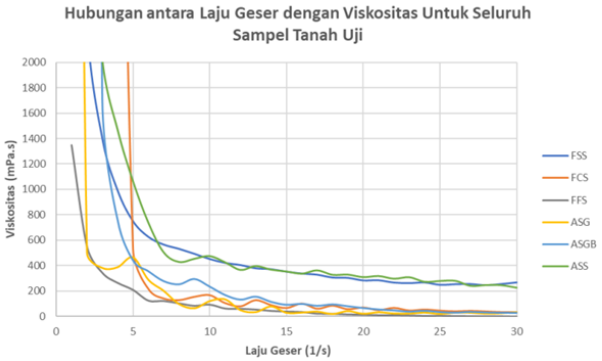
Berdasarkan hasil uji indeks properti tanah, didapatkan grafik distribusi butiran tanah sehingga dapat dilakukan klasifikasi tanah berdasarkan *Unified Soil Classification System* (USCS). Berikut adalah kesimpulan mengenai klasifikasi tanah untuk setiap sampel tanah uji.

Berdasarkan **Gambar 2**, terlihat bahwa keenam sampel memiliki persentase pasir yang tinggi dan termasuk kelas pasir bergradasi buruk pada klasifikasi tanah berdasarkan USCS (Das & Sobhan, 2010). Analisis butiran juga dapat menjadi salah satu cara untuk menganalisis kerentanan tanah dan potensi terjadi likuefaksi pada daerah tersebut, seperti teori (Tsuchida, 1970) dimana tanah pasir bergradasi buruk memiliki potensi yang besar mengalami likuefaksi. Penamaan jenis sampel tanah uji menyesuaikan analisis berdasarkan pengamatan visual dan perabaan oleh tangan saat pengambilan tanah tersebut. Untuk memastikan jenis tanah, dilakukan uji indeks properti dengan hasil pada **Tabel 2**. Dapat dilihat bahwa pada tanah berbutir halus, seperti pasir kelanauan (*silty sand*) memiliki persentase butir halus yang cukup

Berikut merupakan kurva gradasi butiran tanah beserta properti fisik sampel berdasarkan hasil uji berat jenis dan uji analisis butiran.



Gambar 2. Kurva distribusi butiran tanah untuk seluruh sampel tanah uji



Gambar 3. Kurva hasil uji viskositas untuk semua sampel tanah uji pada kadar air 40% dan suhu 25°C

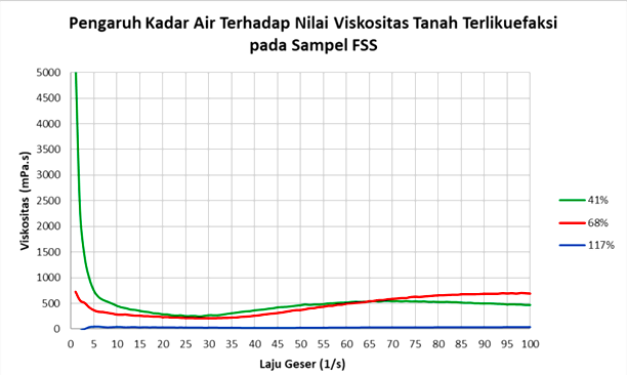
besar. Sedangkan pasir kerikil (*sand gravel*) ataupun pasir kerikil berangkal (*sand gravel boulder*) memiliki persentase butir halus yang lebih sedikit.

3.2 Uji viskositas tanah

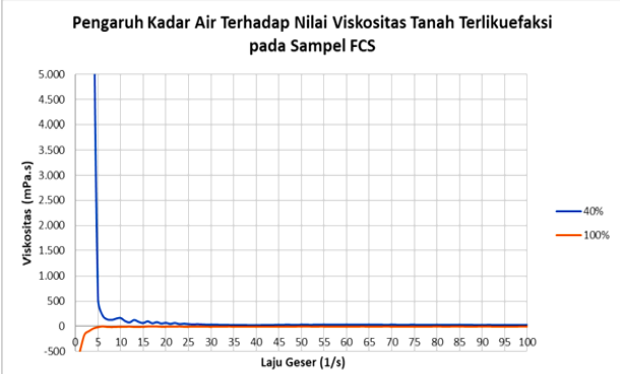
3.2.1 Pengaruh komposisi butiran tanah dan lokasi terhadap karakteristik aliran tanah terlikuefaksi

Untuk dapat menganalisis pengaruh komposisi butiran tanah terhadap nilai viskositas tanah terlikuefaksi diperlukan kondisi pengujian yang sama pada seluruh

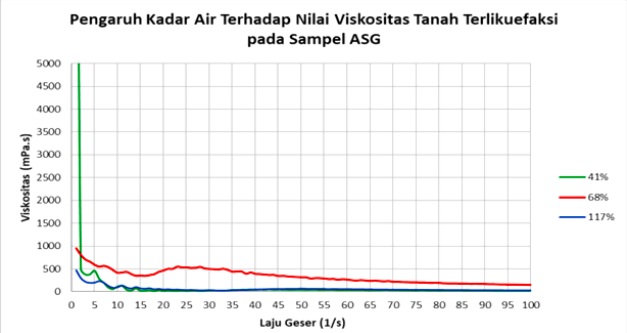
Diterima 6 September 2022, Direvisi 31 Maret 2023, Diterima untuk dipublikasikan 12 April 2023
Copyright ⓒ 2023 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2023.30.1.6



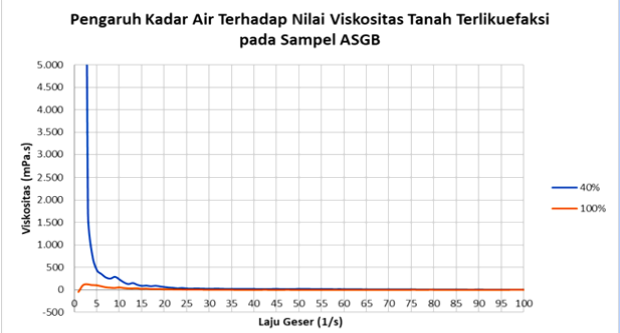
Gambar 4. Kurva hubungan viskositas terhadap kadar air sampel FSS



Gambar 6. Kurva hubungan viskositas terhadap kadar air sampel FCS



Gambar 5. Kurva hubungan viskositas terhadap kadar air sampel ASG



Gambar 7. Kurva hubungan viskositas terhadap kadar air sampel ASGB

sampel tanah uji. Dalam hal ini, dipertimbangkan kondisi pengujian dengan kadar air 40% dan suhu 25°C. Berikut merupakan grafik viskositas untuk keenam sampel tanah uji.

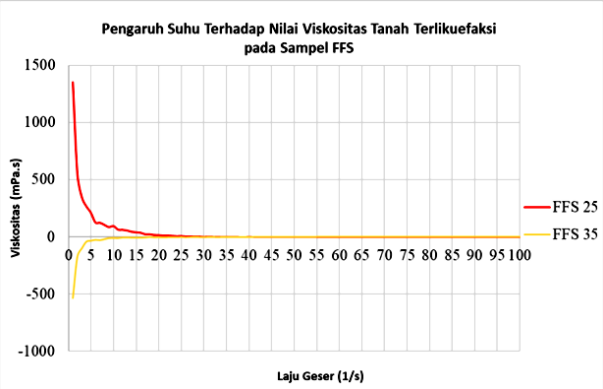
Berdasarkan **Gambar 3**, diketahui bahwa nilai viskositas tanah terlikuefaksi dari seluruh sampel tanah uji semakin menurun seiring bertambahnya laju geser. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh sampel tanah uji memiliki karakteristik aliran tanah Non-Newtonian, yaitu shear thinning. Persentase butir halus dari sampel berpengaruh terhadap nilai viskositas. Pada grafik tersebut terlihat bahwa sampel dengan ukuran butiran yang cenderung lebih besar seperti ASG ataupun ASGB menunjukkan karakteristik viskositas yang menurun dengan lebih curam jika dibandingkan dengan sampel lain. Menurunnya nilai viskositas menunjukkan bahwa gesekan antar partikel yang dapat menghambat laju alir berkurang atau dapat dikatakan sampel dapat mengalir dengan lebih baik saat viskositas menurun. Sampel dengan persentase butir halus yang lebih kecil cenderung memiliki partikel tanah yang lebih besar dan lebih berat sehingga cepat mengendap di dasar wadah.

Pada **Gambar 3**, terlihat bahwa grafik sampel FSS dan ASS bersinggungan pada laju geser lebih dari 20 1/s. Hal ini dapat terjadi karena karakteristik pasir kelanauan yang memiliki persentase butir halus cukup besar. Sehingga saat belum dilakukan pengadukan dan sampel mengendap di dasar wadah, butir halus membuat endapan tersebut lebih padat dan sulit untuk diaduk dibandingkan endapan dengan persentase butir halus yang lebih sedikit. Hal ini karena butir halus mengisi rongga pada butir kasar. Ketika telah diaduk maka kedua sampel ini akan menunjukkan nilai viskositas yang sedikit lebih tinggi dari sampel lainnya karena partikel halus yang bergerak terbaca oleh alat sebagai gesekan/ hambatan. Hal ini menandakan nilai viskositas yang lebih besar akibat ketahanan cairan tersebut untuk mengalir lebih besar. Ketika pengujian dilakukan, dibutuhkan torsi yang lebih besar untuk memutar spindle dan dapat dikatakan viskositas atau kekentalan sampel ini lebih besar dibanding sampel lain.

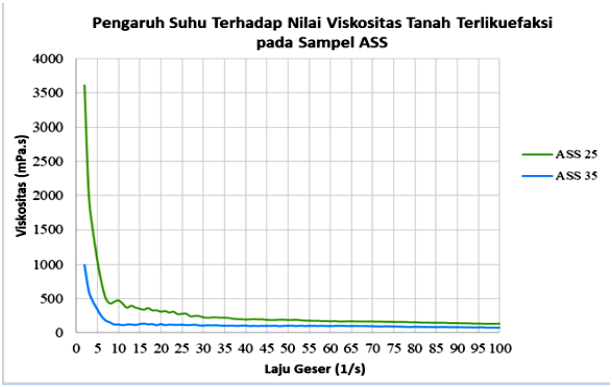
Dari **Gambar 3** juga terlihat bahwa viskositas tanah terlikuefaksi cenderung bernilai konstan pada pemutaran laju geser tinggi. Hal ini disebabkan karena pengadukan yang dilakukan terus menerus menghalangi pasir untuk mengendap di dasar wadah. Meskipun dilakukan pengadukan dalam waktu yang lama, partikel pasir yang cukup besar membuat pasir dan air menjadi campuran heterogen dimana dinding pembatas antar partikel penyusun masih dapat terlihat. Air sebagai material cair akan lebih dominan terbaca oleh alat. Pada kondisi ini, viskositas yang terbaca akan menyerupai karakteristik viskositas dari air yaitu konstan dan memiliki nilai yang sangat kecil hingga mendekati nol.

Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu (Chen et al., 2013) maka hasil telah sesuai dimana penelitian tersebut menyimpulkan bahwa tanah terlikuefaksi merupakan cairan Non – Newtonian berdasarkan uji sphere pulling shaking table. Penelitian lainnya antara lain dan (Nishimura et al., 2002) yang juga menyimpulkan bahwa tanah terlikuefaksi memiliki nilai viskositas yang

Diterima 6 September 2022, Direvisi 31 Maret 2023, Diterima untuk dipublikasikan 12 April 2023
Copyright ⓒ 2023 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2023.30.1.6



Gambar 8. Kurva hubungan viskositas terhadap suhu sampel FFS



Gambar 9. Kurva hubungan viskositas terhadap suhu sampel ASS

berkurang seiring dengan bertambahnya laju geser. Faktor lokasi juga memberikan pengaruh terhadap nilai viskositas meskipun tidak signifikan. Hal ini karena pergerakan tanah akibat peristiwa likuefaksi sangat dipengaruhi oleh kadar air pada kondisi di lapangan. Fakta di lapangan menunjukkan bahwa tanah dari area aliran (flow area) bergerak lebih jauh sehingga dapat diasumsikan viskositas tanah pada daerah ini lebih kecil.

Berdasarkan ketentuan penulisan viskositas kinetik pada (International Standard ISO 3219:1993, 1993) berikut adalah tabel yang merupakan penulisan yang menyatakan nilai viskositas dari seluruh sampel tanah yang diuji (**Tabel 3**).

3.2.2 Pengaruh kadar air terhadap nilai viskositas tanah terlikuefaksi

Pengujian viskositas untuk mengetahui pengaruh kadar air terhadap nilai viskositas tanah terlikuefaksi dilakukan pada sampel FSS, FCS, ASG, dan ASGB. Adapun variasi nilai kadar air yang digunakan juga berbeda. Pada sampel FSS dan ASG, digunakan 3 (tiga) nilai kadar air, yaitu 41%, 68%, dan 117%. Sementara pada sampel FCS dan ASGB, hanya digunakan 2 (dua) nilai kadar air, yaitu 40% dan 100%. Berikut merupakan kurva yang menyajikan nilai viskositas seiring meningkatnya laju geser pada kondisi kadar air yang bervariasi.

Hasil pengujian dengan variasi kadar air menunjukkan bahwa sampel dengan kadar air yang lebih tinggi memiliki viskositas yang lebih rendah. Dengan bertambahnya kadar air pada sampel, komposisi tanah yang terkandung dalam campuran semakin sedikit. Hal ini menyebabkan besar gaya yang diperlukan untuk memutar cairan lebih rendah. Kondisi tersebut terjadi akibat gesekan/hambatan antara cairan dengan wadah yang semakin kecil. Artinya ketahanan cairan untuk mengalir atau nilai viskositasnya semakin kecil. Hasil yang diperoleh mengenai pengaruh kadar air terhadap nilai viskositas ini jika dihubungkan dengan peristiwa likuefaksi di lapangan, yaitu dengan adanya peningkatan tekanan air pori atau bertambahnya kadar air pada lapisan tanah akibat adanya guncangan gempa bumi, maka viskositas tanah akan semakin kecil.

Saat terjadi likuefaksi pada tanah berpasir seragam, rongga pori di antara butiran tanah terisi oleh air. Hal tersebut menyebabkan terjadinya peningkatan tekanan air pori. Dengan terjadinya peningkatan tekanan air pori, butiran tanah dapat bergerak bebas di antara air sehingga menghilangkan ikatan antar butiran tanah. Perubahan tersebut menurunkan ketahanan tanah terhadap tegangan geser dan menyebabkan tanah berkarakteristik seperti cairan yang dapat mengalir/ berdeformasi dengan viskositas yang rendah. Berdasarkan penelitian (Chen et al., 2013) diketahui bahwa viskositas tanah terlikuefaksi meningkat seiring berkurangnya rasio tekanan air pori. Hal ini menunjukkan bahwa dengan terdisipasinya air pori, tanah terlikuefaksi akan kembali memadat dan berhenti berdeformasi.

3.2.3 Pengaruh suhu terhadap nilai viskositas tanah terlikuefaksi

Pengujian viskositas untuk mengetahui pengaruh suhu terhadap nilai viskositas tanah terlikuefaksi hanya dilakukan pada sampel FFS dan ASS. Terdapat 2 (dua) nilai suhu yang digunakan saat pengujian, yaitu sebesar 25°C dan 35°C.

Tabel 3. Hubungan persentase butir halus terhadap nilai viskositas untuk seluruh sampel tanah uji

Sampel Tanah Uji	Persentase Butir Halus [%]	Rentang Nilai Viskositas η(25°C, 5 – 20 s^{-1}) [mPa.s]
FSS	16,16	282,04 – 748,19
FCS	7,99	56,64 – 529,76
FFS	8,73	14,73 – 210,07
ASG	3,23	17,44 – 463,94
ASGB	5,15	64,17 – 439,10
ASS	8,56	308,20 – 1063

Diterima 6 September 2022, Direvisi 31 Maret 2023, Diterima untuk dipublikasikan 12 April 2023
Copyright ⓒ 2023 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2023.30.1.6

Hasil pengujian dengan variasi suhu menunjukkan bahwa sampel dengan suhu 25°C memiliki viskositas yang lebih besar dibanding sampel dengan suhu 35°C. Fenomena ini terjadi karena viskositas air sebagai pelarut campuran sampel yang berkurang seiring dengan kenaikan suhu. Saat suhu meningkat maka energi kinetik pada partikel air meningkat karena panas memberikan getaran yang membuat molekul bergerak dan saling bertabrakan. Kenaikan energi kinetik ini membuat partikel air saling menjauh dan semakin bebas bergerak. Hal inilah yang membuat viskositas dari air berkurang saat suhu meningkat.

Berdasarkan penelitian (Ishida et al., 2007) yang memformulasikan persamaan cairan pada fase cair dan gas dan menganalisis perubahan karakter air terhadap suhu, disimpulkan sebuah grafik yang menunjukkan penurunan viskositas seiring dengan naiknya suhu. Air sebagai pelarut tanah dalam pengujian kali ini berperan penting dimana kenaikan suhu membuat molekul air merenggang sehingga viskositas berkurang.

Hubungan suhu terhadap peristiwa gempa dapat dijelaskan melalui teori anomali suhu sesaat sebelum gempa atau yang biasa disebut satellite thermal infrared anomaly. Beberapa penelitian menyimpulkan bahwa terjadi perubahan suhu yang terdeteksi oleh satelit beberapa waktu sebelum gempa terjadi (Liu et al., 2007) (Saraf et al., 2009). Selain suhu, beberapa parameter fisik dan kimiawi juga mengalami perubahan sehubungan dengan akan terjadinya gempa bumi (Meidita et al., 2021).

4. Kesimpulan

1. Telah dilakukan uji viskositas pada sampel tanah terlikuefaksi untuk mengetahui karakteristik dan perilaku tanah jika dikenakan gaya dengan parameter laju geser tertentu. Hasil yang diperoleh berupa grafik hubungan antara tegangan geser dan viskositas terhadap laju geser.
2. Berdasarkan hubungan antara viskositas dengan laju geser dan dihubungkan terhadap teori reologi mengenai karakteristik aliran cairan, maka sampel tanah terlikuefaksi termasuk dalam **kategori cairan Non - Newtonian yaitu *shear thinning***. Cairan *shear thinning* memiliki perilaku viskositas yang berkurang seiring dengan bertambahnya laju geser.
3. Pada pengujian dengan kondisi tertentu didapatkan kesimpulan bahwa semakin besar kadar air pada sampel maka semakin kecil nilai viskositas dan semakin besar suhu maka semakin kecil nilai viskositas.
4. Berhubungan dengan persentase butir halus, semakin banyak butir halus yang terkandung dalam sampel, maka nilai viskositas dari sampel tersebut cenderung lebih besar. Hal ini disebabkan karena butir halus yang mengisi rongga pada sampel membuat sampel cenderung memadat dan aliran tanah semakin lambat. Pada fenomena likuefaksi di lapangan, terjadi penurunan kuat geser saat terjadi guncangan akibat gempa yang membuat tanah seolah – olah mencair atau kehilangan kekentalannya.

Ucapan Terima Kasih

Riset ini didanai oleh hibah riset Kemenristek/BRIN NKB-389/UN2.RST/HKP.05.00/2021.

Daftar Pustaka

Barnes, H. A. (2000). *A Hanbook of Elementary Rheology*. The University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Department of Mathematics, University of Wales Aberystwyth, Penglais, Aberystwyth, Dyfed, Wales, SY23 3BZ.

Budhyastoro, T., Tala'ohu, S. H., & Watung, R. L. (2013). *Pengukuran Suhu Tanah*. Sifat Fisik Tanah, 261–282.

Chen, Y., Liu, H., & Wu, H. (2013). *Laboratory study on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 17(sup1), s23–s32. https://doi.org/10.1080/19648189.2013.834583

Das, B. M. (1992). *Principles of Soil Dynamics*.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering* (8th editio). Cengage Learning.

Harninto, D. S., & Prakoso, W. A. (2020). *Existence of Silt Seam Layers on Flow Liquefaction Disaster Triggered by The Palu Mw 7.5 Earthquake 2018*. 10th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials and Environment, 11–13.

Hasanzadeh, B. (2017). *ThinkIR : The University of Louisville ' s Institutional Repository Testing and modeling of the thixotropic behavior of cementitious*. *August*.

Husin, H., & Hussain, H. H. (2012). *Temperature Effect on Shear Thinning Behavior of Low-Viscous Oilfield Emulsion*. *Intech*, 13. http://dx.doi.org/10.1039/C7RA00172J%0Ahttps://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.12.014

Hwang, J. I., Kim, C. Y., Chung, C. K., & Kim, M. M. (2005). *Viscous fluid characteristics of liquefied soils and behavior of piles subjected to flow of liquefied soils*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26(2-4 SPEC. ISS.), 313–323. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.02.020

International Standard ISO 3219:1993. (1993).

Ishida, T., Maekawa, K., & Kishi, T. (2007). *Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history*. Cement and Concrete Research, 37(4), 565–

Diterima 6 September 2022, Direvisi 31 Maret 2023, Diterima untuk dipublikasikan 12 April 2023
Copyright ⓒ 2023 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2023.30.1.6

578.https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.015

Lilliestierna, A., & Utas, J. (2015). *Thermal classification of cable route*. 102.

Liu, S., Yang, D., Ma, B., Wu, L., Li, J., & Dong, Y. (2007). *On the features and mechanism of satellite infrared anomaly before earthquakes in Taiwan region*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), January, 3719–3722. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423651

Lumbantoruan, P., & Yulianti, E. (2016). *Pengaruh Suhu terhadap Viskositas Minyak Pelumas (Oli)*. Jurnal Sainmatika, 13(2), 26–34.

Malvern Instruments Limited. (2016). *A Basic Introduction to Rheology*. Whitepaper, 1–19.https://cdn.technologynetworks.com/TN/Resources/PDF/WP160620BasicIntroRheology.pdf

Meidita, D., Martha, A. A., Setiawan, Y., & Rohadi, S. (2021). *Analisis Perubahan Nilai Parameter Fisis Dan Kimiawi Sebagai Studi Prekursor Gempa Bumi Pada Periode 2018 Di Wilayah Yogyakarta,* Value Change Analysis of Physical and Chemical Parameter As an Earthquake Precursor Study in Period of 2018 in the Yogyakarta R. 19– 30.

Nishimura, S., Towhata, I., & Honda, T. (2002). *Laboratory Shear Tests on Viscous Nature of Liquefied Sand. Japanese Geotechnical Society*, 42(4), 89–98. http://www.mendeley.com/research/geology-volcanic-history-eruptive-style- yakedake-volcano-group-central-japan/

Rotational Rheometer Methods. (2012). *Usp 35–Nf 30*, *5651–5654*, 1–5.

Saraf, A. K., Rawat, V., Choudhury, S., Dasgupta, S., & Das, J. (2009). *Advances in understanding of the mechanism for generation of earthquake thermal precursors detected by satellites*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11(6), 373–379. https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.07.003

Tim Pusat Studi Gempa Nasional. (2018). *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (Geer) Akibat Gempa Palu 28September 2018*.

Tsuchida, H. (1970). *Prediction and Countermeasure against Liquefaction in SandDeposits*. https://ci.nii.ac.jp/naid/10007805219/

Tsugawa, J. K., de Oliveira Romano, R. C., Pileggi, R. G., & Boscov, M. E. G. (2019). *Review: Rheology concepts applied to geotechnical engineering*. Applied Rheology, 29(1), 202–221. https://doi.org/10.1515/arh-2019-0018

Yang, Z., & Elgamal, A. (2001). *Sand Boils and Liquefaction--Induced Lateral Deformation*. 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1989, 345–350.

Diterima 6 September 2022, Direvisi 31 Maret 2023, Diterima untuk dipublikasikan 12 April 2023
Copyright ⓒ 2023 Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB, ISSN 0853-2982, DOI: 10.5614/jts.2023.30.1.6