

PENENTUAN VISKOSITAS DAN YIELD STRESS DENGAN FLOW BOX TEST UNTUK MUDFLOW

Budijanto Widjaja¹, Nessiana Yovita²

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan
Jl. Ciumbuleuit 94 Bandung 40141 Telp 0222033691 Ext 445
Email: geotek.gw@gmail.com

Abstrak

Mudflow sebagai salah satu bentuk pergerakan tanah perlu dikaji lebih lanjut terutama penentuan parameter tanahnya. Komposisi utama mudflow umumnya berupa tanah berbutir halus yang mampu bergerak dengan kecepatan tinggi. Kadar air mudflow secara kualitatif berada pada level sama atau lebih tinggi dari batas cairnya. Untuk itu diperlukan penerapan ilmu reologi yang berkaitan dengan masalah aliran material tertentu. Mudflow dapat dikategorikan sebagai material non Newtonian di mana parameter yang dibutuhkan adalah viskositas dan yield stress. Namun, hal ini sangat sulit diperoleh dengan penggunaan viskometer konvensional. Oleh karena itu, flow box test dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari viskometer tersebut. Salah satu keuntungan flow box test adalah mampu memberikan informasi parameter reologi pada kondisi plastis dan kondisi cairan kental. Keuntungan ini dimaksudkan untuk menjelaskan lebih lanjut karakteristik mudflow berdasarkan variasi kadar air. Dengan menggunakan studi kasus mudflow di Sukaresmi yang terjadi pada 18 Januari 2013, parameter reologi diperoleh dari uji flow box test. Hubungan antara viskositas dan indeks kecairan memperlihatkan bahwa mudflow dapat terjadi pada saat kadar air sama atau lebih tinggi dari batas cairnya. Jika kadar air berada di bawah batas cair dapat diklasifikasikan sebagai longsoran tanah. Oleh karena itu, kontribusi makalah ini adalah untuk memberikan informasi tentang karakteristik mudflow berdasarkan variasi kadar air berdasarkan hasil flow box test.

Kata kunci: cairan kental; flow box test; indeks kecairan; kondisi plastis; viskositas; yield stress

Pendahuluan

Mudflow sebagai salah satu bentuk pergerakan tanah yang sering terjadi dan acapkali menelan korban harta jiwa dan manusia. Salah satu kasus di Indonesia adalah kasus mudflow di Sukaresmi, Cianjur, Jawa Barat yang terjadi pada tanggal 18 Januari 2013. Bencana alam ini dapat bergerak dengan kecepatan relatif cepat lebih dari 5 cm/det. Karena sifatnya yang mendadak dan kecepatan pergerakan yang cepat tersebut, material tanah bergerak dan menghantam serta merusak penghalang di depannya (misalnya, bangunan rumah tinggal) melalui jalur permukaan tanah yang dilaluinya. Material *mudflow* didominasi oleh tanah lempung jenuh air. Kadar air sewaktu kejadian dapat mencapai atau lebih besar dari batas cair (LL). Karena sifat tersebut, *mudflow* berada dalam kondisi berupa cairan kental. Untuk itu, pendekatan reologi dengan menggunakan model Bingham dibutuhkan untuk menjelaskan parameter reologi *mudflow*.

Studi ini bertujuan untuk memaparkan uji flow box yang dikembangkan oleh Widjaja (2012) dan Widjaja and Lee (2013). Uji ini digunakan untuk memperoleh parameter viskositas pada beberapa variasi kadar air (w). Dengan kedua nilai tersebut, selanjutnya dapat disimulasikan dengan menggunakan program Flo2d. Pembahasan makalah ini dibatasi pada penentuan parameter reologi.

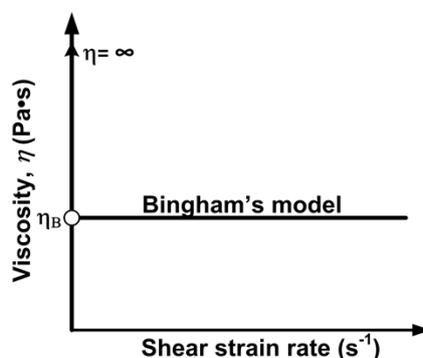
Bahan dan Metode Penelitian

Mudflow sebagai cairan kental dapat dipahami menggunakan pendekatan reologi. Reologi adalah ilmu yang mempelajari tentang aliran (Lorenzini and Mazza, 2004). Umumnya *mudflow* dianggap sebagai material non Newtonian di mana nilai viskositas (η) dan *yield stress* (τ_y) mempengaruhi perilaku material tersebut. Karena pada saat inisiasi mudflow terjadi secara seketika sehingga perilaku *undrained* terjadi. Oleh karena itu, τ_y pada *mudflow* dapat dianggap sama dengan nilai kohesi (c) material tanah (O'Brien and Julien, 1988).



Gambar 1. Lokasi mudflow Sukaesmi, Cianjur, Jawa Barat

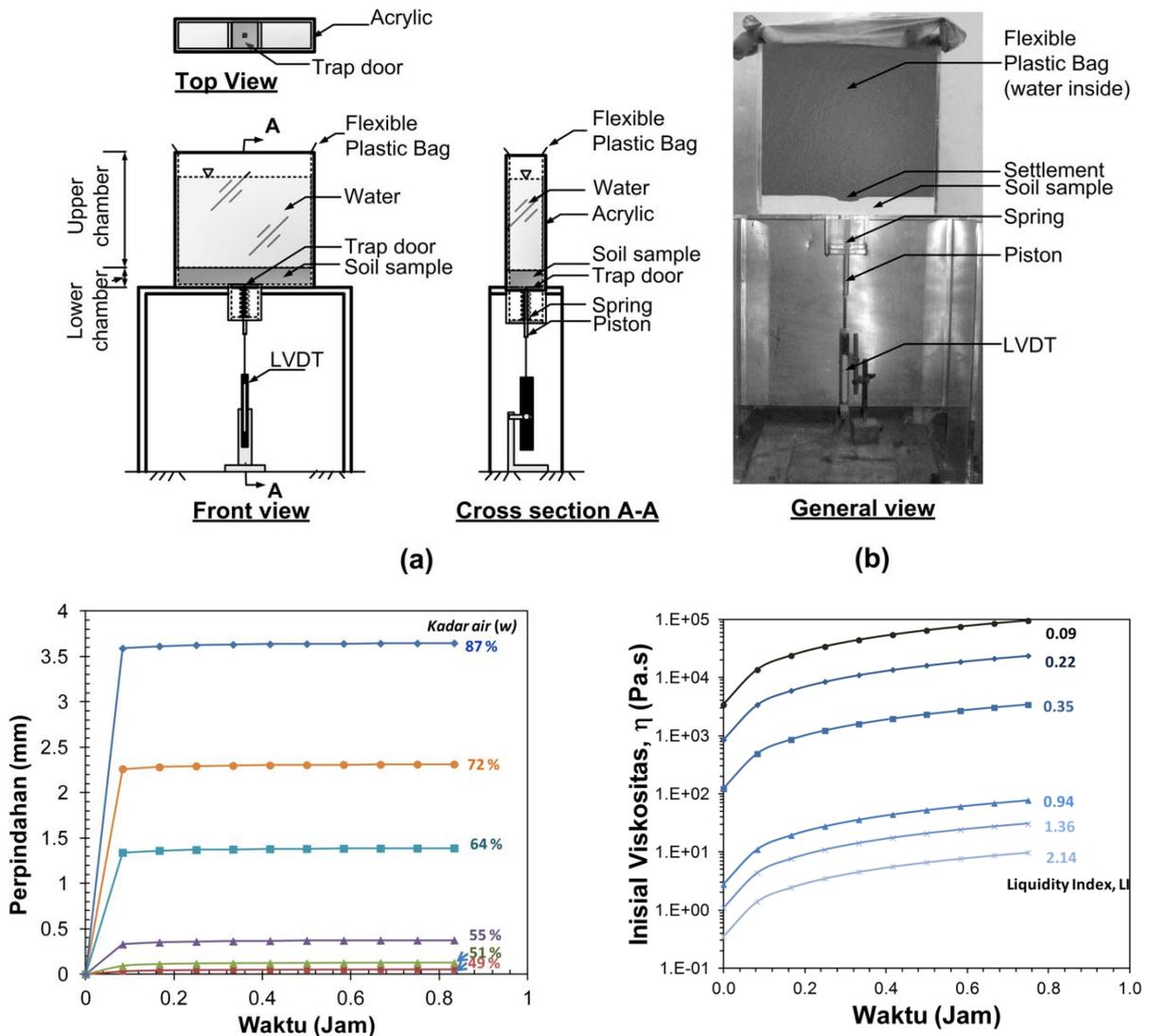
Model reologi yang umum digunakan untuk menjelaskan perilaku mudflow adalah model Bingham. Model ini menyederhanakan perilaku mudflow dengan menganggap perubahan regangan terjadi pada saat material memiliki viskositas (η) konstan (Gambar 2). Pada saat tegangan geser lebih rendah dari *yield stress* (dalam hal ini sama dengan kohesi), material tidak bergerak. Namun, pada saat tegangan geser lebih tinggi daripada kohesi, material bergerak dan perilaku pergerakan *mudflow* ditentukan oleh nilai η .



Gambar 2. Hubungan antara viskositas dan shear strain rate model Bingham (Widjaja and Lee, 2013)

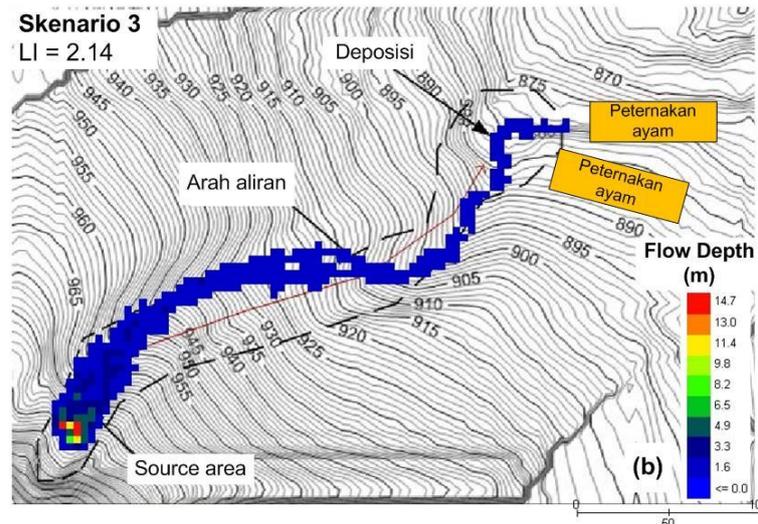
Alat untuk mengukur viskositas (η) disebut viskometer. Namun, alat ini memiliki keterbatasan hanya mampu mengukur η pada keadaan cairan kental (*viscous liquid*) atau pada saat kadar air di atas batas cair (LL). Kenyataannya, mudflow dapat terjadi pada saat kadar air di sekitar LL atau lebih tinggi dari LL sehingga viskometer konvensional tersebut tidak dapat digunakan untuk mengetahui perilaku *mudflow*. Oleh karena itu, Widjaja and Lee (2013) membuat viskometer yang berhubungan erat dengan perilaku *mudflow* yang disebut dengan Flow Box Test (FBT). Alat ini memiliki kelebihan untuk mengukur η baik pada keadaan plastis (*plastic state*) maupun cairan kental (*viscous liquid state*). Dasar pengembangan alat ini adalah menggunakan kombinasi teori *trap door* (Terzaghi, 1943) dan model reologi Bingham. Umumnya teori *trap door* ini dipakai untuk menjelaskan fenomena *arching effect* pada tanah. Namun, dalam hal ini kombinasi tersebut mampu mereplika kondisi *mudflow* yang diturunkan dari hubungan kecepatan terhadap waktu. Setelah itu, dengan integrasi kurva kecepatan terhadap waktu ini, dapat diperoleh kurva hubungan pergerakan terhadap waktu. Kurva inilah yang akhirnya menjadi data awal untuk menentukan viskositas di laboratorium menggunakan FBT (Gambar 3).

Keluaran dari FBT adalah hubungan antara pergerakan terhadap waktu untuk kadar air tertentu yakni data tersebut dicatat dengan menggunakan bantuan LVDT (Gambar 4). Kurva hasil FBT ini kemudian dilakukan upaya penyesuaian dengan kurva yang diturunkan dari teori *trap door* dan model Bingham yakni menggunakan modifikasi dari model Herschel-Bulkley. Jika sudah mengalami penyesuaian, nilai viskositas kemudian dapat dihitung dengan mengambil nilai kohesi adalah konstan. Pada awalnya nilai viskositas ini merupakan fungsi waktu. Namun, pada akhirnya digunakan satu nilai viskositas konstan yakni pada saat waktu $t=0$ (Gambar 4). Selanjutnya, dibuat variasi kadar air yang lain sehingga diperoleh satu set data lengkap yang mewakili keadaan plastis dan cairan kental. Detail lengkap berupa prosedur uji ini dapat dilihat pada Widjaja (2012) dan Widjaja and Lee (2013).



Gambar 4. Hubungan perpindahan dan waktu untuk *mudflow* Sukaresmi (gambar kiri); Penentuan viskositas terhadap waktu (gambar kanan)

Material tanah dari *mudflow* yang terjadi di Sukaresmi ini digunakan sebagai studi kasus. Makalah ini bertujuan adalah untuk mengumpulkan *database* kejadian *mudflow* dengan menggunakan keluaran dari hasil FBT di laboratorium. Lebih jauh lagi, simulasi komputer misalnya dengan program Flo2d dapat menggunakan parameter reologi FBT tersebut untuk mempelajari perilaku *mudflow* dengan lebih detail (Gambar 5). Beberapa studi kasus menggunakan parameter yang diturunkan dari FBT dapat dilihat pada Lee and Widjaja (2013).



Gambar 5. Simulasi tipikal mudflow Sukaesmi dengan program Flo2d

Hasil dan Pembahasan

Mudflow terjadi di daerah perbukitan Gunung Karanggantung Beunying Kampung Legok Lebe RT 02/07 Desa Pakuon Kecamatan Sukaesmi Kabupaten Cianjur. Bukit ini sebagian besar digunakan oleh penduduk setempat sebagai daerah bercocok tanam berupa ladang dan kebun dari kondisi yang awalnya berupa hutan. Pengalihan fungsi lahan ini pun bisa menjadi salah satu pemicu terjadinya *mudflow*. Ditambah dengan ditemukannya mata air di dekat *source area* dan hujan lebat yang turun selama beberapa hari sebelum terjadi *mudflow*. *Mudflow* bergerak dari *source area* hingga area deposisi selama kurang lebih 20 menit. Material akhirnya berhenti di kaki bukit di mana pada daerah itu terdapat peternakan ayam milik warga. Bukit ini memiliki tinggi lebih dari 150 m dengan kecuraman lereng rata-rata 30°. Volume material *mudflow* yang berpindah diperkirakan sebesar 1261 m³ di mana volume di *source area* dan area deposisi sama besarnya.

Sampel tanah terganggu diambil di lokasi *mudflow* Sukaesmi. Tanah ini kemudian dilakukan pengujian sifat fisis seperti ditunjukkan di Tabel 1. Kadar air alamiah (*w*) adalah 66.41%. Batas cair (*LL*) dan batas plastis (*PL*) berturut-turut adalah 66 dan 47.52. Kadar air alamiah dalam hal ini lebih tinggi di atas *LL*. Hal ini menunjukkan indikasi bahwa material berada dalam kondisi cairan kental (*viscous liquid state*). Berdasarkan klasifikasi USCS, material tanah ini adalah lanau dengan plastisitas tinggi (*MH*).

Hasil uji saringan dan uji hidrometer menunjukkan bahwa sampel memiliki komposisi butiran kasar sebesar 3.27% dan butiran halus dengan komposisi lanau lebih tinggi sebesar 70.13% dibandingkan dengan lempung yaitu sebesar 26.6%. Komposisi ini menunjukkan bahwa material ini didominasi oleh tanah berbutir halus dan menjadi salah satu indikator karakteristik *mudflow*.

Tabel 1. Parameter tanah untuk kasus *mudflow* Sukaesmi

Sampel Tanah	<i>LL</i>	<i>PL</i>	<i>PI</i>	<i>G_s</i>	<i>w</i> %	USCS
Sukaesmi	66	47.52	18.48	2.55	66.41	<i>MH</i>

Catatan: *LL* = batas cair; *PL* = batas plastis; *PI* = indeks plastisitas;
G_s = berat jenis; *w* = kadar air alami

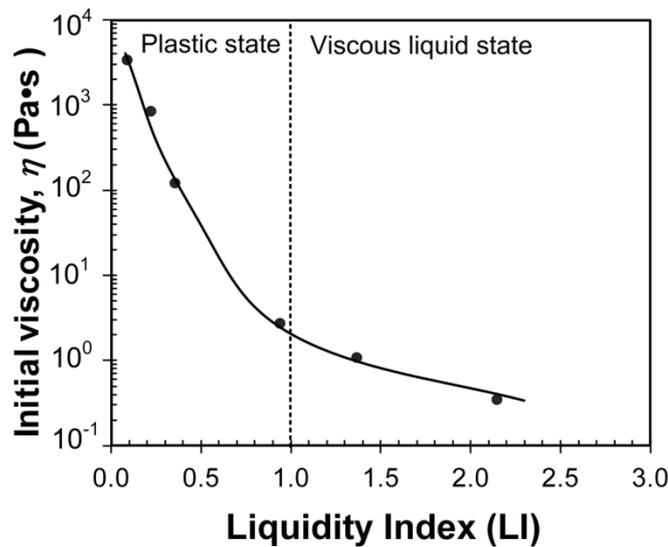
Mudflow mulai terjadi pada saat kadar air mendekati batas cair (*LL*) atau pada saat indeks kecairan sebesar 1. Indeks kecairan (*LI*) didefinisikan sebagai berikut:

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL} \tag{1}$$

Hasil uji viskositas untuk lokasi *mudflow* Sukaesmi dengan menggunakan Flow Box Test (FBT) dapat dilihat pada Gambar 6. Kadar air dibuat bervariasi yaitu 49%, 51%, 55%, 64%, dan 87% sehingga rentang *LI* berada antara 0.09 – 2.14. Pada saat *LI*=1, kadar air adalah sama dengan batas cair. Jadi, FBT dalam hal ini dapat memberikan informasi nilai viskositas pada dua keadaan yaitu kondisi plastis (*LI*<1) dan kondisi cairan kental (*LI*≥1). Pada kondisi plastis, nilai viskositas (*η*) relatif tinggi yaitu antara 2.75 Pa•s– 3400 Pa•s. Sedangkan untuk

kondisi cairan kental, nilai η berada dalam rentang 0.35 Pa•s– 2.75 Pa•s. Sebagai gambaran, air memiliki η sebesar 1 mPa•s.

Karakteristik umum perilaku *mudflow* dapat digambarkan sebagai berikut berdasarkan Gambar 6. Pada mulanya, material tanah akan bergerak dengan nilai viskositas tinggi di kondisi plastis. Seiring dengan peningkatan kadar air secara perlahan, nilai viskositas tanah mengalami reduksi hingga suatu saat kadar air sama dengan batas cair (LI=1). Dengan peningkatan kadar air ini, viskositas akan turun dan tanah akan bergerak relatif cepat dan *mudflow* dapat terjadi pada kondisi ini.



Gambar 6. Hubungan antara Indeks Kecairan (LI) dan viskositas untuk *mudflow* Sukaesmi

Kesimpulan

Flow Box Test dirancang oleh penulis untuk menentukan nilai viskositas dari material *mudflow*. Salah satu keuntungan penggunaan alat ini adalah mampu memberikan informasi viskositas pada dua kondisi yaitu kondisi plastis (saat kadar air lebih rendah dari batas cair) dan kondisi cairan kental (*viscous liquid state*, saat kadar air sama atau lebih tinggi dari batas cair). Pada kondisi cairan kental, tanah dalam keadaan mengalir dan dianggap *mudflow* terjadi. Pada kondisi plastis, rentang viskositas berada pada 2.75 Pa•s - 3400 Pa•s sedangkan pada kondisi cairan kental rentang viskositas berada pada 0.35 Pa•s - 2.75 Pa•s. Semakin kecil nilai viskositas suatu tanah, semakin besar kecepatan *mudflow* saat mengalir. Perubahan nilai viskositas dari kondisi plastis ke kondisi cairan kental yang sangat drastis menyebabkan *mudflow* terjadi. Karakteristik perilaku *mudflow* dapat diturunkan dari hubungan viskositas dan indeks kecairan. *Mudflow* berdasarkan hubungan ini terjadi pada saat terjadi reduksi viskositas akibat peningkatan kadar air. Pada saat kadar air sama dengan batas cair, *mudflow* dapat terjadi dan bergerak dengan kecepatan relatif tinggi. Peningkatan kadar air dapat terus berlangsung dan menyebabkan viskositas semakin rendah namun dengan pengurangan nilai yang landai.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Unpar atas sumber pendanaan penelitian ini. Selain itu, tidak lupa kami ucapkan terima kasih kepada Prof. Shannon Hsien-Heng Lee dari Taiwan Tech, World Bank melalui program JIPS atas penyediaan dana untuk pembuatan Flow Box Test. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Prof. Paulus P. Rahradjo atas dukungan penelitian ini dan Wahyuning Aila atas simulasi program Flo2d.

Daftar Notasi

- c = kohesi, kPa
- FBT = flow box test
- G_s = berat jenis

<i>IP</i>	= indeks plastisitas
<i>LL</i>	= batas cair
<i>LI</i>	= indeks kecairan
LVDT	= <i>linear variable differential transformer</i>
<i>PL</i>	= batas plastis
<i>USCS</i>	= <i>Unified Soil Classification System</i>
<i>w</i>	= kadar air, %
η	= viskositas, Pa•s
τ_y	= <i>yield stress</i> , kPa

Daftar Pustaka

- Lee, S.H.H. and Widjaja, B. (2013), "Phase Concept for mudflow based on the influence of viscosity" *Soils and Foundations*, Vol. 53 (1) pp. 77-90.
- Lorenzini, G. and Mazza, N. (2004), "Debris Flow Phenomology and Rheological Modeling", WIT Press
- O'Brien, J.S. and Julien, P.Y. (1988), "Laboratory Analysis of Mudflow Properties" *J. Hydraul. Eng.*, Vo. 114(8), pp. 877-887.
- Widjaja, B. (2012), "*Viscosity Determination of Soil in Plastic and Viscous Liquid States for Elucidating Mudflow Behavior*", PhD Thesis, Department of Construction Engineering, Taipei, National Taiwan University of Science and Technilogy, Taiwan
- Widjaja, B. and Lee, S.H.H., (2013), "Flow Box Test for Viscosity of Soil in Plastic and Viscous Liquid" *Soils and Foundations*, Vol. 53 (1) pp. 35-46.