PENGARUH KURVA HISTERESIS TERHADAP MODEL STABILITAS LERENG TIMBUNAN AKIBAT KEGIATAN PERTAMBANGAN DI ZONA LAHAN BASAH

The influence of hysteresis curve on the stability model of disposal slope due to mining activities in wetland zone

Reza Adhi Fajar^{1*}, Lilik Eko Widodo², Gunawan Handayani³, Tedy Agung Cahyadi¹

¹ Program Doktor Rekayasa Pertambangan ITB, Ganesa 10, Bandung, Indonesia

² Staf Pengajar dan Grup Riset Eksplorasi Sumberdaya Bumi ITB, Ganesa 10, Bandung, Indonesia

³ Staf Pengajar dan Grup Riset Fisika Bumi ITB, Ganesa 10, Bandung, Indonesia

*Corresponding author: reza@poliban.ac.id

Abstract. Landfill of residual soil due to mining activity in the wetland area is a relatively complex issue due to the soft soil conditions that are vulnerable to landslides. The stabilization method to increase the safety factor from landslide hazard can be done by decreasing the degree of water saturation in the soil disposal. In this case, the dominant mechanical parameters used in slope stability analysis will be elaborated with the SWCC concept for soft soil. While the conceptual model is built, it is based on the phenomenon of negative pore water pressure that appears in the vadose zone on the groundwater surface. The information provided from the hysteresis curve configuration can be used as an additional reference for the optimistic disaster analysis.

Keyword: hysteresis, stability, disposal, soil, saturation.

1. PENDAHULUAN

Karakteristik media tanah tak jenuh dalam siklus infiltrasi dan evaporasi, akan membentuk hubungan *hysteresis* yang juga disebut sebagai *soil water characteristic curve* (SWCC). Umumnya, SWCC diperoleh dari pengujian laboratorium untuk mendapatkan hubungan antara tekanan air negatif (suction) terhadap kadar air atau derajat kejenuhan pada sampel tertentu. Namun demikian, ia juga sebenarnya juga merupakan representasi dari kondisi lapangan yang ditunjukkan sebagai hubungan antara matric suction, selisih tekanan udara dan air, terhadap parameter kekuatan tanah tak jenuh (Fredlund dan Rahardjo, 1993)

Di sisi lain, galian tanah akibat kegiatan pertambangan di daerah lahan basah seringkali menimbulkan persoalan kemantapan lereng terlebih bilamana di daerah yang berdekatan dengan pemukiman. Analisa kemantapan lereng yang dipergunakan dalam menghitung probabilitas kebencanaan cenderung pada asumsi pesimistik dimana tanah residu tersebut dianggap dalam kondisi jenuh air sehingga kemiringan timbunan menjadi sangat landai. Tulisan ini mengeksplorasi pengaruh variasi tekanan negatif pori air guna analisis kebencanaan yang bersifat optimistik.

2. METODE

Pendekatan yang dilakukan mengacu pada pengetahuan tentang mekanika tanah tak jenuh dengan memperhitungkan kontribusi kuat geser tambahan di atas muka air dalam timbunan. Gambar 1 mengilustrasikan bahwa genangan air tidak merata pada timbunan tanah sehingga terjadi pengurangan tegangan total di sebagian zona dekat permukaan.

Gambar 1. Distribusi Tegangan di atas Muka Airtanah (Fredlund & Rahardjo 1993)

Sehingga kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb juga harus disesuaikan dengan konsep tak jenuh sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2, dengan persamaan kuat geser sebagai berikut (Fredlund & Rahardjo 1993):

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_{nf} - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (1)$$

dengan τ_{ff} , u_{af} , $\phi^b (\sigma_f - u_a)$ adalah, kuat geser tanah tak jenuh, tekanan air pori tanah di bidang runtuh pada saat failure, sudut kuat geser efektif terhadap matric suction, dan variabel tegangan normal di bidang runtuh saat failure. Sedangkan kohesi:

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (2)$$

Gambar 2. Diagram Selubung Kekuatan Mohr-Coulomb untuk media tak jenuh (Fredlund dan Rahardjo, 1993)

Namun demikian, dalam perhitungan kelongsoran lereng tanah tersebut, tetap mengikuti konsep piasan (Bishop & Blight 1963) dengan penambahan beberapa variabel baru (gambar 3), yakni:

- Persamaan kuat geser

$$S_m = \beta / F \{ c' + (\sigma_f - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \}$$

- Persamaan gaya normal

$$W - (X_R - X_L) - S_m \sin \alpha - N \cos \alpha = 0$$

$$N = \frac{W - (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha}{F} + u_a \frac{\beta \sin \alpha}{F} (\tan \phi - \tan \phi^b) + u_w \frac{\beta \sin \alpha}{F} \tan \phi^b}{\cos \alpha + \frac{\beta \sin \alpha}{F} \tan \phi^b}$$

- Persamaan FK untuk Momen

$$A_L a_L + \sum (W \cdot x) - \sum (B \cdot f) - \sum (S_m \cdot R) = 0$$

$$F_m = \frac{\sum \left[c' \beta R + \left\{ N - u_w \beta \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi} - u_a \beta \left(1 - \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi} \right) \right\} R \tan \phi \right]}{A_L a_L + \sum (W \cdot x) - \sum (N \cdot f)}$$

- Persamaan FK untuk Gaya

$$-A_L + \sum (S_m \cos \alpha) - \sum (N \sin \alpha) = 0$$

$$F_f = \frac{\sum \left[c' \beta R + \left\{ N - u_w \beta \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi} - u_a \beta \left(1 - \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi} \right) \right\} \tan \phi' \cos \alpha \right]}{A_L + \sum (N \sin \alpha)}$$

dengan fungsi gaya antar pias dari hubungan

$$(E_R - E_L) = N \cos \alpha \tan \alpha - S_m \cos \alpha, \text{ dan}$$

$$X = \lambda \cdot f(x) E \text{ dengan } f(x) = K \cdot e^{-(C'' \omega'')/2} \text{ dan}$$

$$K = \exp \{ D_i - D_s (D_f - 1.0) \}$$

Gambar 3. Modifikasi Komponen Gaya Dalam Metoda Bishop (Fajar dkk, 2001)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Parameterisasi

Untuk keperluan simulasi, kemiringan awal lereng timbunan diasumsikan dalam kondisi jenuh air (di seluruh titik) sehingga dimensinya menjadi sangat landai.

Gambar 4. Kemiringan Lereng Timbunan (simulasi)

Sedangkan model tanah residu (*soft over burden*) yang disimulasikan adalah lempung dengan kepadatan yang relatif rendah dengan parameter fisik sebagaimana ditunjukkan pada tabel 1. Hal ini bersesuaian dengan kurva hubungan hysteresis parameter kuat geser tanah tak jenuh untuk kondisi tanah yang serupa (gambar 5). Di lain pihak, parameter mekanik yang diambil merupakan komposisi dari pengujian *direct shear* dan *triaxial* (tabel 2). Parameter ϕ^b diprediksi setara dengan 95% dari nilai parameter ϕ (Chiu dkk 2012, Song 2014)

Tabel 1. Parameter Fisik Tanah Timbunan

Column 1	Satuan	Nilai
Kandungan Air Tanah	%	15,79
Berat Jenis	-	2,54
Berat Isi Basah	kN/m ³	17,25
Berat Isi Kering	kN/m ³	14,90
Angka Pori	-	0,67
Porositas	%	40,20
Derajat Kejenuhan	%	59,66

Sumber: Laboratorium Mekanika Tanah (lempung densitas rendah)

Gambar 5. Hubungan non-linier parameter ϕ^b dan matric suction untuk tanah lempung dengan kerapatan rendah (Oh & Lu 2015)

3.3 Simulasi Model

Perhitungan dilakukan dengan memanfaatkan aplikasi *macro* dalam perangkat lunak *spreadsheet* (MS.Excel) dengan konvergensi yang relatif stabil setelah iterasi ke-7 (gambar 6). Input parameter dibuat bervariasi terhadap tekanan air pori negatif menurut 4 (empat) jenis hasil uji sifat mekanik, masing-masing dalam prosedur *unconsolidated undrained* (UU), *consolidated undrained* (CU) dan *consolidated drained* (CD). Angka faktor keamanan ditetapkan sama atau lebih dari 1,25.

Gambar 6. Contoh Perhitungan (macro-excel)

Rekapitulasi perhitungan ditunjukkan pada tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Hasil Analisis Kemantapan Lereng Timbunan

Metoda & Kondisi	Parameter acuan			-u _w (kPa)	Sudut Lereng (°)	Faktor Keamanan	
	C (kPa)	φ(°)	φ ^b (°)			Fm	Fk
Triaxial – UU:							
Jenuh	4,9	8,1	-	10	6,2	1,25	3,58
Direct Shear:							
Jenuh	4,7	18,4	17,48	0	7,2	1,25	5,63
Tak Jenuh	4,7	18,4	17,48	-5	7,6	1,25	5,62
Tak Jenuh	4,7	18,4	17,48	-10	8,1	1,25	5,57
Tak Jenuh	4,7	18,4	17,48	-20	9,0	1,25	5,46
Triaxial – CU:							
Jenuh	4,4	14,2	13,49	0	5,8	1,25	6,49
Tak Jenuh	4,4	14,2	13,49	-5	6,1	1,25	6,46
Tak Jenuh	4,4	14,2	13,49	-10	6,4	1,25	6,42
Tak Jenuh	4,4	14,2	13,49	-20	7,0	1,25	6,33
Triaxial – CD:							
Jenuh	3,9	19,1	18,15	0	4,3	1,25	5,05
Tak Jenuh	3,9	19,1	18,15	-5	5,0	1,25	5,12
Tak Jenuh	3,9	19,1	18,15	-10	5,5	1,25	5,17
Tak Jenuh	3,9	19,1	18,15	-20	6,6	1,25	5,18

Kompilasi ini menggambarkan bahwa besar penerjalan sudut pada lereng timbunan dapat ditingkatkan hingga 10%.

4. SIMPULAN

Pengaruh variasi tekanan negatif pori air pada tanah timbunan hasil aktivitas pertambangan di daerah lahan basah, telah disimulasikan. Kurva *hysteresis* atau SWCC disini, digambarkan sebagai kurva hubungan parameter kuat tanah tak jenuh terhadap variasi *matric suction*. Sentuhan analisis sensitivitas yang diterapkan dalam konteks bahaya longsor (kebencanaan) di daerah lahan basah ini, bersifat optimistik,

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih atas bantuan pendanaan LP3I-ITB sehingga tulisan ini dapat dipublikasikan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Bishop, A.W & Blight, G.E (1963) Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Unsaturated Soils. *Journal of Geotechnics*. 13:177–197
- Chiu, C.F., Yan, W.M., Yuen, K-V (2012) Reliability analysis of soil–water characteristics curve and its application to slope stability analysis. *Journal of Engineering Geology* 135-136:83–91

Fajar, R.A (2001). *Penentuan Parameter Kekuatan Tanah Tak Jenuh Untuk Analisis Kemantapan Lereng (unpublished thesis)*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Fredlund, D.G & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics For Unsaturated Soils*. Toronto: A Wiley-Interscience Publication: John Wiley & Sons, Inc.

Oh, S. & Lu, N. (2015). Slope stability analysis under unsaturated conditions: Case studies rainfall-induced failure of cut slopes. *Journal of Engineering Geology* 184:96-103.

Song, Y-S (2014) Suction stress in unsaturated sand at different relative densities. *Journal of Engineering Geology* 176:1–10