

# PENENTUAN SIFAT TEKNIS TANAH JENUH SEBAGIAN DAN ANALISIS DEFORMASI LERENG AKIBAT PENGARUH VARIASI HUJAN

*Determination of Unsaturated Soil Properties and Slope Deformation Analysis  
due to the Effect of Varies Rainfall*

Sony PRAMUSANDI<sup>1)</sup>, Ahmad RIFA'I<sup>2)</sup>, Kabul Basah SURYOLELONO<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta Kampus Baru UI Depok 16425

<sup>2), 3)</sup>Jurusan Teknik Sipil Universitas Gajahmada Yogyakarta

## Abstract

Recently, landslides often occurs in natural slope in Indonesia, which is associated with the coming rainy season . The increment of ground water level cause by rainfall is affected the properties and behavior of soil especially the unsaturated soil. Generally, the stability of slope is evaluated based on safety factor, but the deformation occurred at the soil can also be a good interest in assesing the stability of slope. This research is focused to observe the change of pore water pressure and ascoociate deformation considering the hydro-mechanical properties of unsaturated soil due to the effect of varies rainfall. In this research, numerical simulation was carried out to analysis the deformation of the slope affected by pore water pressure change due to rainfall using software-based Finite Element Method of SIGMA/W and SEEP/W from GEO-SLOPE 2004. Unsaturated soil properties, such as Soil Water Characteristic Curve (SWCC) and Hydraulic Conductivity function are obtained from laboratory test and also predicted based on grain-size distribution using psycho-empirical method in SOILVISION Database. HAVARA is used to help rainfall data analysis using statistic approach. Rainfall model is used to vary the moisture content to model unsaturated soil condition. There are six rainfall models, consists of one steady state model and followed by five transient model to accomodate the pore water pressure changes due to rainfall. The results show that rainfall with intensity near saturated permeability of soil gives more significant influence in increasing pore water pressure and deformation than normal rainfall even with long duration. Proposed countermeasure by providing counterweight and subdrain do not significantly effect the deformation, but it could improves the safety factor significantly, so that the slope is more in stable condition.

*Keywords : landslide, unsaturated soil properties, pore water pressure, slope deformation, numerical simulation, finite element method, countermeasures.*

## PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara tropis yang mempunyai 2 musim yaitu musim hujan dan musim kemarau. Perubahan musim tersebut memberikan pengaruh penting terhadap fenomena alam. Pengaruh peristiwa alam yang berupa penguapan (evaporasi dan evapotranspirasi) dan persipitasi (hujan) tersebut mengakibatkan terjadinya fluktuasi muka air tanah. Naiknya muka air tanah akibat hujan mempengaruhi sifat dan perilaku tanah dalam merespon tekanan/beban yang terjadi. Akhir-akhir ini, sering terjadi bencana tanah longsor di Indonesia, yang dikaitkan dengan datangnya musim hujan. Seperti yang terjadi pada bangunan SPBU Sambipitu yang berlokasi di jalan Yogyakarta-Wonosari Km 13 Sambipitu Wonosari, Yogyakarta yang mengalami keruntuhan dan rusak berat akibat

lereng timbunan mengalami longsor setelah beberapa hari turun hujan.

Peristiwa tanah longsor atau dikenal sebagai gerakan massa tanah, batuan atau kombinasi keduanya, sering terjadi pada lereng-lereng alam atau buatan, sebenarnya merupakan fenomena alam dimana alam mencari keseimbangan baru akibat adanya gangguan atau faktor yang mempengaruhi dan menyebabkan terjadinya pengurangan kuat geser serta peningkatan tegangan geser tanah (Suryolelono, 2003).

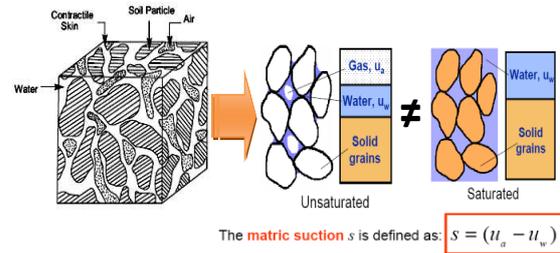
Sayangnya, dalam usaha untuk memahami fenomena di atas, diperlukan pengujian lapangan dan laboratorium untuk tanah jenuh sebagian yang membutuhkan waktu lama dan biaya yang tidak sedikit. Namun seiring dengan perkembangan teori dan teknologi pada bidang geoteknik khususnya masalah

tanah jenuh sebagian, maka sifat teknis tanah jenuh sebagian tersebut dapat diperoleh melalui pendekatan empiris yang berdasarkan pada sifat fisik dasar tanah seperti misalnya distribusi gradasi butiran dan hubungan berat-volume tanah (Fredlund et al., 1997). Hal ini dimungkinkan dengan adanya suatu *Knowledge-Based System* yang merupakan kumpulan informasi 6000 database tanah yang diperoleh dari para ahli di lapangan dan publikasi jurnal terkini yang tertuang dalam software SoilVision.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan sifat teknis tanah jenuh sebagian dengan prediksi berdasarkan sifat fisik dasar tanah (distribusi gradasi butiran dan hubungan berat-volume tanah) dan meneliti deformasi lereng yang terjadi akibat pengaruh variasi hujan. Batasan yang digunakan dalam ruang lingkup penelitian ini adalah analisis tegangan dan regangan pada lereng ditinjau secara dua dimensi (*plane strain*) dan tanah dimodelkan sebagai *elastic-plastic* dengan tipe parameter tegangan efektif serta menggunakan kriteria keruntuhan *Morh-Coulumb extended*.

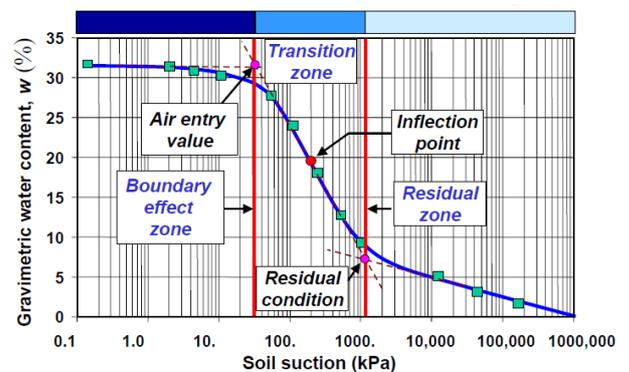
### Tanah Jenuh Sebagian Elemen

Tanah jenuh sebagian umumnya mempunyai tiga fase elemen yaitu fase butiran, air dan udara, berbeda dengan tanah jenuh yang hanya mempunyai dua fase (butiran dan air) yang menimbulkan hadirnya dua jenis tekanan pori yaitu tekanan air pori  $u_w$  dan tekanan udara pori  $u_a$  yang mengakibatkan adanya batas (*interface*) antara air dan udara yang dikenal dengan sebutan *contractile skin* (Fredlund dan Morgenstern, 1997) yang diperlihatkan Gambar 1. Selisih antara  $u_w$  dan  $u_a$  disebut dengan *matric suction*. Dengan adanya *contractile skin* dan *matric suction* ini maka interaksi antara butiran, air dan udara menimbulkan perilaku hidro-mekanik yang kompleks pada elemen tanah jenuh sebagian (Rifa'i, 2002).



Gambar 1 Elemen tanah jenuh sebagian (Fredlund dan Rahardjo, 1993).

Hubungan antara jumlah air dalam tanah dan *suction* yang dimiliki tanah digambarkan dalam suatu kurva yang disebut *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC). Jumlah air di sini bisa berupa kadar air *gravimetric water content* ( $w$ ), *volumetric water content* ( $\theta$ ) atau derajat kejenuhan ( $S$ ) (Vanapilli et al, 1996) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2. SWCC sering juga disebut *Soil Water Retention Curve* (SWRC) yang menggambarkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air.



Gambar 2 Fungsi Gravimetric Water Content (Fredlund et al. 1996).

### Tegangan Efektif

Keberhasilan Terzaghi (1939) dalam menjabarkan tegangan efektif pada tanah jenuh air sebagai selisih antara tegangan total dan tekanan air pori seperti pada persamaan 1 memicu banyak peneliti melakukan penelitian untuk mendapatkan konsep yang sama untuk tanah jenuh sebagian seperti yang diperlihatkan pada persamaan 2 dan dikenal sebagai *Morh-Coulumb extended criterion* (Fredlund dan Morgenstern, 1997).

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \dots\dots\dots(1)$$

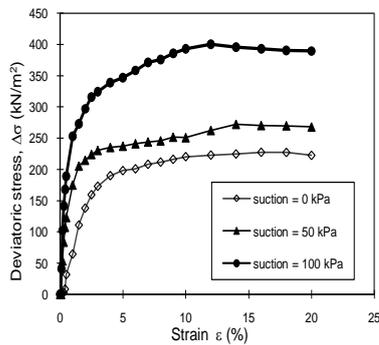
$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \dots\dots\dots(2)$$

dengan

- $\tau$  = tegangan geser (kN/m<sup>2</sup>),
- $c'$  = kohesi efektif (kN/m<sup>2</sup>),
- $\sigma'$  = tegangan normal efektif (kN/m<sup>2</sup>),
- $u_a$  = tekanan udara pori (kN/m<sup>2</sup>),
- $u_w$  = tekanan air pori (kN/m<sup>2</sup>),
- $\phi'$  = sudut gesek dalam efektif (derajat).
- $\phi_b$  = sudut gesek yang berhubungan dengan perubahan kuat geser terhadap perubahan *matric suction*.

**Modulus Elastisitas**

Nilai kekakuan tanah biasanya dinyatakan dalam suatu nilai modulus elastisitas tanah berdasarkan hubungan tegangan-regangan tanah yang dapat diperoleh dari pengujian laboratorium berupa uji triaksial (*triaxial test*) maupun uji tekan bebas (*unconfined compression test*). Wijayanti (2006) telah melakukan penelitian mengenai pengaruh *suction* terhadap nilai kekakuan tanah lanau yang berasal daerah Sambipitu (sama dengan lokasi penelitian) dengan menggunakan alat uji triaksial yang dimodifikasi dan disimpulkan bahwa modulus elastisitas tanah meningkat 320% ketika *suction* naik dari 0 hingga 100 kPa (Gambar 3).



Gambar 3 Modulus elastisitas tanah yang dipengaruhi oleh perubahan *suction* pada uji triaksial modifikasi dengan  $\sigma_3=200$  kPa (Wijayanti, 2006).

**Teori Estimasi SWCC**

Pemodelan rembesan (*seepage*) memerlukan penggunaan SWCC untuk menentukan jumlah kandungan air dalam tanah berdasarkan berbagai nilai *suction* tanah. SWCC biasanya diukur menggunakan pengujian *pressure plate*. Prosedur ini sangat memakan waktu dan biaya sehingga metode estimasi menjadi alternatif yang sering diinginkan. Umumnya, kebanyakan SWCC memerlukan deskripsi dari distribusi gradasi butiran dan 3 parameter volume-berat lapangan seperti porositas, berat volume kering dan berat spesifik. Berbagai pendekatan yang digunakan dalam estimasi SWCC ini (Fredlund, 2006) dibagi menjadi 3 kategori yaitu: point regression method, functional parameter regression method dan physical model method.

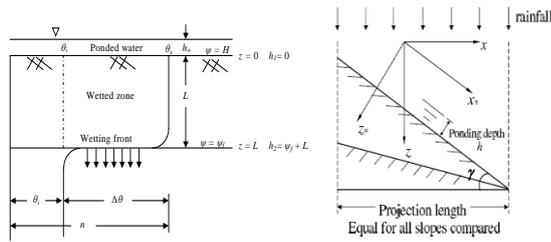
**Analisa Curah Hujan**

**Infiltrasi Hujan**

Infiltrasi adalah aliran air ke dalam tanah melalui permukaan tanah dan gerakannya dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan gaya kapiler. Laju infiltrasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu kedalaman genangan dan tebal lapisan jenuh, kelembaban tanah, pemadatan oleh hujan, tanah penutup, intensitas hujan dan sifat-sifat fisik tanah (Triatmodjo, 2009). Untuk model infiltrasi Green-Ampt dikembangkan untuk model pada permukaan horizontal. Sedangkan aplikasi pada permukaan tanah miring membutuhkan modifikasi seperti yang diusulkan oleh Chen dan Young (2006) pada persamaan 3 dan 4 serta Gambar 4 di bawah ini.

$$f(t) = k \left[ \cos \beta + \frac{(\psi_f \Delta \theta)}{F(t)} \right] \dots\dots\dots(3)$$

$$F(t) = k_y t + \frac{(\psi_f \Delta \theta)}{\cos \beta} \ln \left[ 1 + \frac{F(t) \cos \beta}{(\psi_f \Delta \theta)} \right] \dots\dots(4)$$



Gambar 4 Modifikasi model infiltrasi Green-Ampt pada bidang miring (Chen dan Young, 2006).

**Pengaruh Hujan Terhadap Kestabilan Lereng**

Hujan diperkirakan sebagai penyebab utama terjadinya kelongsoran (Brand,1994 dalam Lim et.al, 1996). Meningkatnya kandungan air dalam tanah dapat disebabkan oleh hujan selama periode tertentu, sehingga tegangan efektif menurun dan berakibat tegangan geser dalam tanah menurun pula (Suryolelono, 2001). Bemmelen (1949) dalam Saroso (2002) menyatakan, longsor dapat terjadi akibat dipicu curah hujan yang tinggi yaitu 70mm/jam.

Karnawati (1997) melakukan studi menggunakan *slope hydrodynamic numerical modeling* untuk mengidentifikasi karakteristik hujan pemicu longsor. Berdasarkan penelitian tersebut, curah hujan yang relatif rendah (25 mm/hari) dapat memicu terjadinya longsor pada bagian penutup lereng dengan permeabilitas  $2,51 \times 10^{-6}$  m/dt. Karakteristik hujan pemicu longsor dikontrol oleh tingkat permeabilitas dari tanah penutup lereng dan muka air tanah. Prasetyowati dan Subiyanti (2007) menyatakan bahwa hujan normal berdurasi panjang merupakan hujan yang paling berpengaruh terhadap perubahan tekanan air pori dan gerakan atau deformasi pada lereng.

**Deformasi dan Aliran Air**

Untuk analisis tegangan-deformasi dengan metode elemen hingga, pemodelan tanah menjadi sangat penting peranannya karena akan menentukan perilaku dari pada tanah tersebut. Model *elasto-plastic* dalam SIGMA/W menggambarkan hubungan sifat

elastis dan plastis sempurna. Sebuah material *elasto-plastic* akan mengalami tegangan sebanding dengan regangan sampai titik luluh (*yield point*) tercapai, setelah mengalami kondisi luluhnya kurva tegangan-regangan menjadi horisontal sempurna (Krahn, 2004). Besarnya tegangan tidak akan bertambah meskipun material tersebut mengalami regangan yang sangat besar. Pada saat material mengalami luluh, pertambahan regangan pada saat kondisi plastis tersebut dapat dibagi menjadi komponen elastis dan plastis, sehingga dapat dituliskan sebagai persamaan berikut:

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} \dots\dots\dots (5)$$

dengan

- $\{d\varepsilon\}$  = matriks regangan total,
- $\{d\varepsilon^e\}$  = matriks regangan elastis,
- $\{d\varepsilon^p\}$  = matriks regangan plastis.

Untuk menggambarkan tepat pada titik luluh (*yield point*) digunakan fungsi luluh (*yield function*) dengan simbol F. Besarnya pertambahan pada fungsi luluh dari F dengan menggunakan metode *derivatif parsial* akan diperoleh persamaan berikut:

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \sigma_x} d\sigma_x + \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} d\sigma_y + \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} d\sigma_z + \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} d\tau_{xy} \dots (6)$$

Bentuk persamaan konstitutif untuk hubungan kenaikan tegangan-regangan untuk permasalahan 2 dimensi dipaparkan oleh Biot (1941) dalam Krahn (2004), yaitu:

$$\begin{Bmatrix} \Delta(\sigma_x - u_a) \\ \Delta(\sigma_y - u_a) \\ \Delta(\sigma_z - u_a) \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 \\ & & & \frac{(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\left(\varepsilon_x - \frac{u_a - u_w}{H}\right) \\ \Delta\left(\varepsilon_y - \frac{u_a - u_w}{H}\right) \\ \Delta\left(\varepsilon_z - \frac{u_a - u_w}{H}\right) \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix} \dots (7)$$

dengan

- $\varepsilon$  = regangan normal,
- $\gamma$  = regangan geser,
- $E$  = modulus elastisitas tanah (kN/m<sup>2</sup>),
- $H$  = modulus tanah jenuh sebagian yang berhubungan dengan perubahan *matric suction* ( $u_a - u_w$ ) (kN/m<sup>2</sup>),
- $\nu$  = *poisson ratio*.

Sedangkan untuk aliran 2 dimensi dari air pori yang melalui elemen volume tanah dalam kondisi *steady state* ditunjukkan oleh persamaan 8 sebagai berikut (Krahn, 2004):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x (u_w) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y (u_w) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots (8)$$

dengan

- $h$  = tinggi energi total (m),  
 $k_x(u_w)$ , and  $k_y(u_w)$  = koefisien permeabilitas (m/detik), arah sumbu x dan y, tergantung tinggi tekanan air pori ( $u_w$ ),  
 $q$  = *applied boundary flux* (mm/jam),  
 $\theta$  = *volumetric water content*,  
 $t$  = waktu (detik).

Jika aliran diasumsikan dalam kondisi *steady state*, maka nilai aliran dari suatu elemen harus sama dengan 0. Dengan kata lain, aliran masuk dan keluar dari volume elemen adalah sama sepanjang waktu, sehingga menjadikan ruas kanan dari persamaan 8 di atas itu hilang dan persamaannya berubah menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x (u_w) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y (u_w) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = 0 \dots (9)$$

Bila diasumsikan tidak ada penambahan tekanan akibat beban luar selama proses *transient*, maka persamaan menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x (u_w) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y (u_w) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = m_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \dots (10)$$

dengan

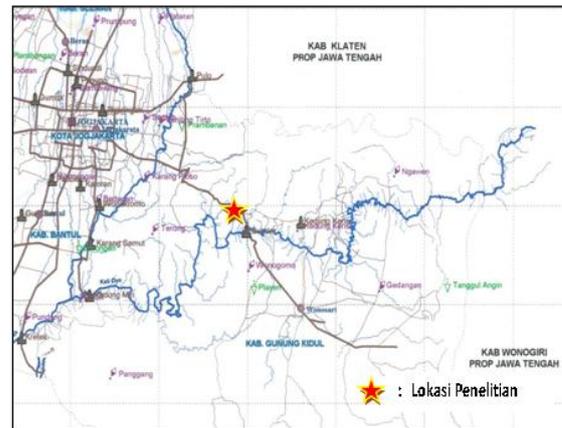
- $m_w$  = bagian yang miring dari kurva hubungan *matric suction* ( $u_a - u_w$ ) dengan  $\theta_w$ .

## METODOLOGI

### Bahan

Penelitian ini menggunakan dua jenis tanah, yaitu tanah lempung dan lanau, yaitu tanah lempung diperoleh dari daerah Wates, sedangkan tanah lanau diperoleh dari daerah Sambipitu. Lokasi penelitian berada pada lereng di bawah bangunan SPBU Sambipitu yang berlokasi di jalan Yogyakarta-Wonosari Km 13 Sambipitu Wonosari, Yogyakarta (Gambar 5). Dari hasil pengukuran koordinat menggunakan GPS dapat diketahui lokasi

berada pada koordinat  $7^\circ 53' 20.730''$  LS dan  $110^\circ 32' 17.180''$  BT.



Gambar 5 Lokasi Penelitian di Sambipitu Wonosari Yogyakarta (Dinas Kimpraswil Balai PSDA Wilayah Progo-Opak-Oyo, 2006)

### Tahapan

Langkah pertama dari penelitian ini adalah mengumpulkan data sekunder yang diperlukan. Data tanah diperoleh berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Suryolelono dan Rifa'i (2003) dan hasil pengujian sifat fisik dan pengujian *filter paper method* serta geser langsung yang dilakukan Yuniar dan Hidayah (2010). Pengujian *filter paper* dilakukan dengan tujuan memperoleh hubungan antara kandungan air dengan *suction* pada tanah. Pengujian geser langsung yang dilakukan dengan variasi kadar air bertujuan untuk mendapatkan pengaruh *suction* terhadap peningkatan nilai kuat geser tanah. Untuk data hujan diperoleh dari Dinas Kimpraswil Balai PSDA Wilayah Progo-Opak-Oyo.

Selanjutnya pengujian laboratorium dilakukan untuk memperoleh parameter tanah jenuh air seperti koefisien permeabilitas tanah jenuh air ( $k_{sat}$ ) yang diperoleh berdasarkan pengujian permeabilitas jenis *falling head*, kohesi efektif ( $c'$ ) dan sudut gesek dalam efektif ( $\phi'$ ) yang diperoleh berdasarkan pengujian geser langsung (*consolidated drained*) (ASTM 3080).

Langkah berikutnya adalah penentuan sifat tanah jenuh sebagian yaitu memprediksi

SWCC berdasarkan *grain size distribution* (GSD) dan hubungan volume-berat tanah. SWCC tersebut bersama dengan nilai koefisien permeabilitas tanah jenuh air kemudian digunakan untuk mendapatkan prediksi fungsi permeabilitas tanah jenuh sebagian. Hasil tersebut selanjutnya akan dibandingkan dengan cara pengukuran langsung yang dilakukan Hidayah dan Yuniar (2010) dan cara mencocokkan dengan system database tanah di Soil Vision yang dilakukan Handoko (2010).

Langkah berikutnya adalah analisis data hujan yang didapat dari 4 stasiun hujan di sekitar lokasi penelitian yang dianggap mewakili karakteristik hujan di lokasi karena pada penelitian ini tidak dilakukan pengukuran hujan secara langsung di lapangan dengan periode pengamatan selama 16 tahun (1993-2008). Kemudian dianalisis untuk mengetahui lama kejadian hujan yang paling sering terjadi dan distribusi hujan jam-jamannya. Setelah itu dilakukan analisis frekuensi hujan untuk mendapatkan besaran hujan dengan variasi kala ulang menggunakan software Havara. Selanjutnya menentukan hujan rencana (*rainfall model*) yang akan digunakan sebagai input analisis deformasi lereng dalam simulasi numeris.

Langkah terakhir adalah simulasi numeris yang diawali dengan pembuatan profil geometri lereng dan perlapisan tanah berdasarkan peta topografi, pengamatan dan hasil pemboran tanah. Selanjutnya dilakukan penetapan input parameter yang dibutuhkan baik dalam analisis tekanan air pori pada lereng menggunakan SEEP/W maupun analisis tegangan-deformasi lereng menggunakan SIGMA/W.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

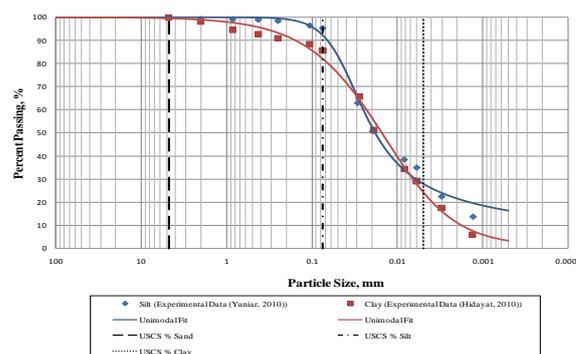
### Sifat Fisik dan Klasifikasi Tanah

Sifat fisik dan klasifikasi tanah dari sampel tanah lempung dan lanau telah diteliti oleh Yuniar dan Hidayah (2010) dan hasilnya diperlihatkan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1 Sifat fisik dan klasifikasi tanah

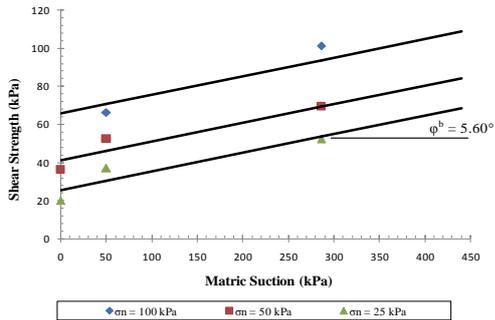
Parameters	Clay	Silt
Specific Gravity, $G_s$	2.594	2.551
Liquid limit, $L_L$	86.34%	87.69%
Plastic limit, $P_L$	30.03%	42.74%
Plasticity index, $P_I$	56.31%	44.95%
Shrinkage limit, $S_L$	9.26%	16.92%
Natural water content, $w$	36.36%	58.20%
Bulk density, $\gamma_b$ ( $g/cm^3$ )	1.65	1.6
Dry density, $\gamma_d$ ( $g/cm^3$ )	1.21	1.01
Porosity, $n$	0.53	0.60
Void ratio, $e$	1.144	1.52
% passing no.200 (fines)	85.78%	95.45%
% retained no.200 (coarse)	14.22%	4.55%
USCS	CH	MH

Berdasarkan klasifikasi tanah *Unified Soil Classification System* (USCS), maka tanah lanau tersebut termasuk golongan *High Plasticity Silt* (MH), sedangkan tanah lempung merupakan *High Plasticity Clay* (CH) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6 di bawah ini.

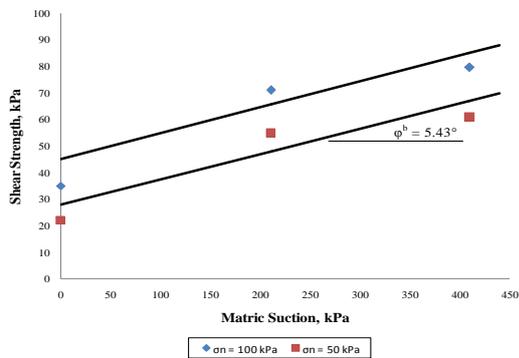


Gambar 6 Distribusi gradasi butiran dan persamaan unimodal fit dari Fredlund (Yuniar dan Hidayah 2010).

Nilai koefisien permeabilitas dalam kondisi jenuh air diperoleh sebesar  $3.86 \times 10^{-4}$  cm/detik untuk MH dan CH sebesar  $5.78 \times 10^{-4}$  cm/detik dan disimpulkan bahwa keduanya merupakan lapisan semi kedap air (*semi pervious layer*). Hasil pengujian geser langsung CD menunjukkan bahwa kohesi efektif untuk MH adalah 4 kPa dan CH sebesar 15.39 kPa, sedangkan sudut gesek dalam efektif untuk CH sebesar  $32^\circ$  dan CH sebesar  $15.63^\circ$ , serta  $\phi_b$  diperoleh sebesar  $5.6^\circ$  untuk MH (Gambar 7) dan  $5.43^\circ$  untuk CH (Gambar 8).



Gambar 7 Perubahan kuat geser akibat perubahan *matric suction* untuk MH (Yuniar, 2010).



Gambar 8 Perubahan kuat geser akibat perubahan *matric suction* untuk CH (Hidayah, 2010).

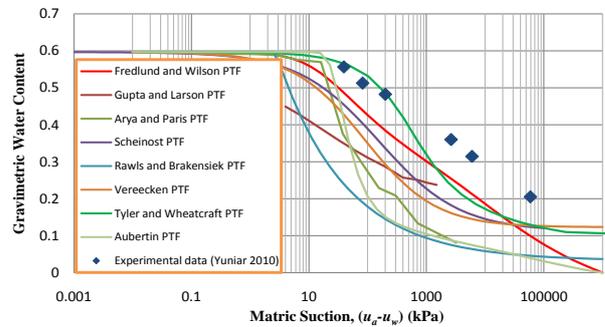
**Penentuan Sifat Teknis Tanah Jenuh Sebagian**

Untuk estimasi SWCC yang diperoleh berdasarkan distribusi gradasi butiran dan hubungan volume-berat tanah dengan menggunakan metode-metode estimasi yang terdapat dalam SOILVISION diperlihatkan pada Gambar 9 untuk MH dan ditetapkan menggunakan SWCC yang dihasilkan oleh Fredlund dan Wilson PTF. SWCC hasil estimasi tersebut kemudian diplotkan bersama dengan SWCC hasil pengukuran langsung (Yuniar, 2010) dan hasil pencocokan dengan sistem database (Handoko, 2010) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 10.

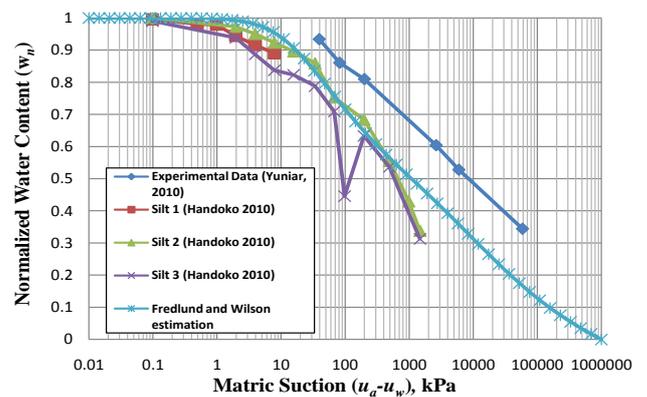
Demikian pula halnya untuk tanah CH, terlihat dalam memprediksi SWCC, tanah lempung CH dinilai lebih sulit dibandingkan dengan tanah lanau MH yang ditunjukkan dengan tidak ada satupun kurva SWCC yang menyinggung titik hasil pengujian *filter paper*

(Gambar 11). Apabila diplotkan bersama dengan kedua metode lainnya, hasilnya seperti terlihat pada Gambar 12.

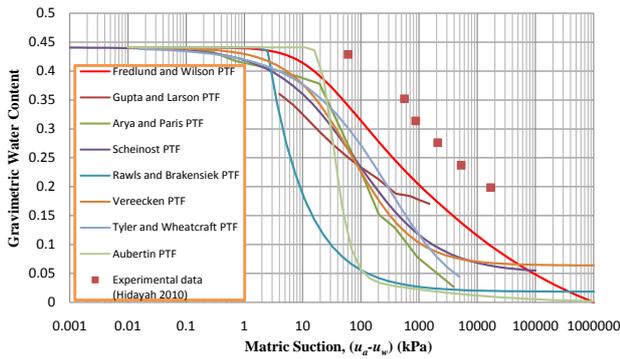
Setelah menetapkan SWCC hasil estimasi Fredlund dan Wilson PTF sebagai SWCC yang dipilih, berikutnya adalah mendapatkan fungsi permeabilitas tanah jenuh sebagian berdasarkan nilai koefisien permeabilitas tanah jenuh air ( $k_{sat}$ ) dan SWCC terpilih tadi seperti yang terlihat pada Gambar 13 yang menunjukkan grafik fungsi permeabilitas tanah jenuh sebagian terhadap nilai *suction* untuk tanah MH dan CH.



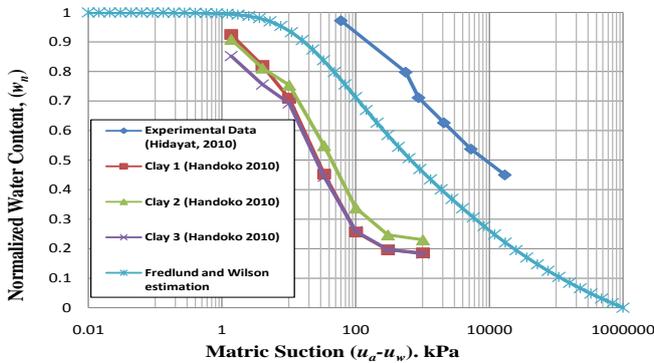
Gambar 9 Estimasi SWCC tanah MH yang diperoleh dari berbagai metode yang terdapat dalam SoilVision.



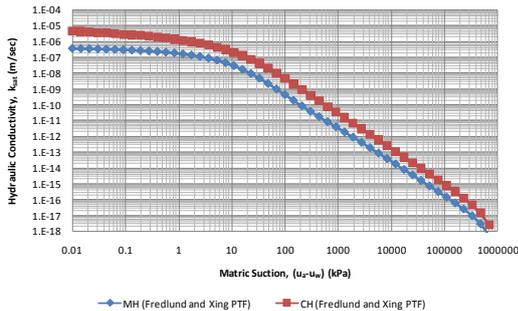
Gambar 10 SWCC tanah MH dari ketiga metode penentuan properti tanah jenuh sebagian.



Gambar 11 Estimasi SWCC tanah CH yang diperoleh dari berbagai metode yang terdapat dalam SoilVision.



Gambar 12 SWCC tanah CH dari ketiga metode penentuan properti tanah jenuh sebagian.

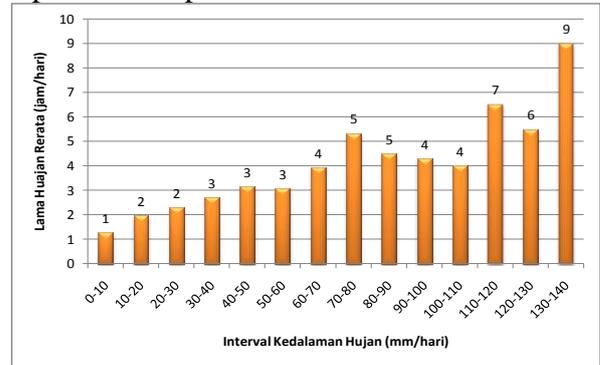


Gambar 13 Fungsi koefisien permeabilitas tanah jenuh sebagian untuk tanah MH dan CH.

### Analisis Curah Hujan

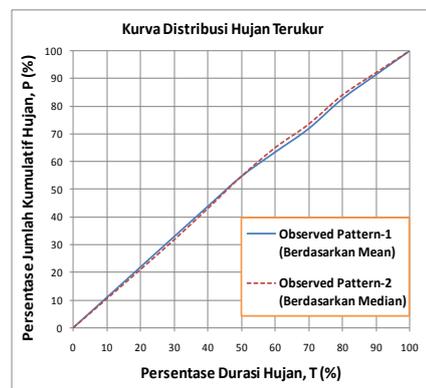
Dari data hujan yang tersedia dari keempat stasiun hujan selama 16 tahun pengamatan, Terlihat bahwa lama kejadian hujan merata pada tiap interval yang sering terjadi adalah 3 jam/hari dan 4 jam/hari yang masing-masing

terjadi di 3 interval hujan. Pada penelitian ini lama hujan merata ditetapkan sebesar 4 jam/hari dengan pertimbangan karena mempunyai durasi hujan yang lebih lama dan intensitas hujan yang lebih tinggi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 14 berikut ini.



Gambar 14 Lama hujan merata pada lokasi pengamatan.

Untuk mengetahui distribusi hujan jam-jamannya, dibuat kurva hubungan antara persentase kedalaman hujan dan persentase durasi hujan dari seluruh data hujan yang mempunyai durasi hujan lebih dari 1 jam (1532 kejadian hujan) sehingga diperoleh kurva distribusi hujan terukur (*observed pattern*) yang terdiri atas *observed pattern-1* yang berdasarkan nilai rerata (*mean*) dan *observed pattern-2* yang berdasarkan nilai tengah (*median*) seperti terlihat pada Gambar 15 di bawah ini.



Gambar 15 Kurva persentase distribusi kedalaman hujan.

Selanjutnya dilakukan analisis frekuensi hujan untuk mendapatkan besaran hujan dengan kala ulang yang telah ditetapkan

dengan menggunakan software HAVARA. Untuk desain kedalaman hujan maksimum yang akan dipakai pada simulasi yaitu kedalaman hujan pada kala ulang 2 tahun dengan intensitas 120,4 mm karena kedalaman hujan dengan kala ulang 2 tahun dianggap sebagai intensitas hujan yang kemungkinan paling sering terjadi di lapangan.

Berdasarkan pengamatan curah hujan dengan periode pengamatan selama 16 tahun (1993-2008) di lokasi penelitian, maka hujan rencana yang digunakan dalam penelitian ini ditetapkan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 berikut ini. Kemudian masing-masing intensitas dibuat distribusi intensitas hujan tiap jamnya seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 2 Hujan rencana yang ditetapkan dalam simulasi numeris

Model Hujan	Tipe Hujan	Total Durasi	Tujuan
I	Tanpa hujan	0	<i>Steady seepage analysis</i> , untuk pengamatan kondisi awal
II	Hujan sangat deras 120.4mm/hari berdurasi 4 jam	4 jam	Pengamatan pengaruh hujan sangat deras berdurasi pendek terhadap deformasi lereng
III	Hujan normal 10mm/hari selama 10 hari + hujan sangat deras 120.4mm/hari selama 2 hari	288 jam (12 hari)	Pengamatan pengaruh hujan terhadap deformasi lereng pada awal musim hujan
IV	Hujan sangat deras 120.4mm/hari selama 2 hari + tanpa hujan selama 3 hari + hujan normal 40mm/hari selama 3 hari	192 jam (8 hari)	Pengamatan pengaruh hujan terhadap deformasi lereng pada tengah-tengah musim hujan
V	Hujan normal 30mm/hari selama 4 hari + tanpa hujan selama 3 hari + hujan normal 10mm/hari selama 8 hari	360 jam (15 hari)	Pengamatan pengaruh hujan terhadap deformasi lereng pada akhir musim hujan
VI	Hujan normal 10mm/hari selama 20 hari	480 jam (20 hari)	Pengamatan pengaruh hujan normal berdurasi panjang terhadap deformasi lereng

Tabel 3 Distribusi intensitas hujan jam – jaman

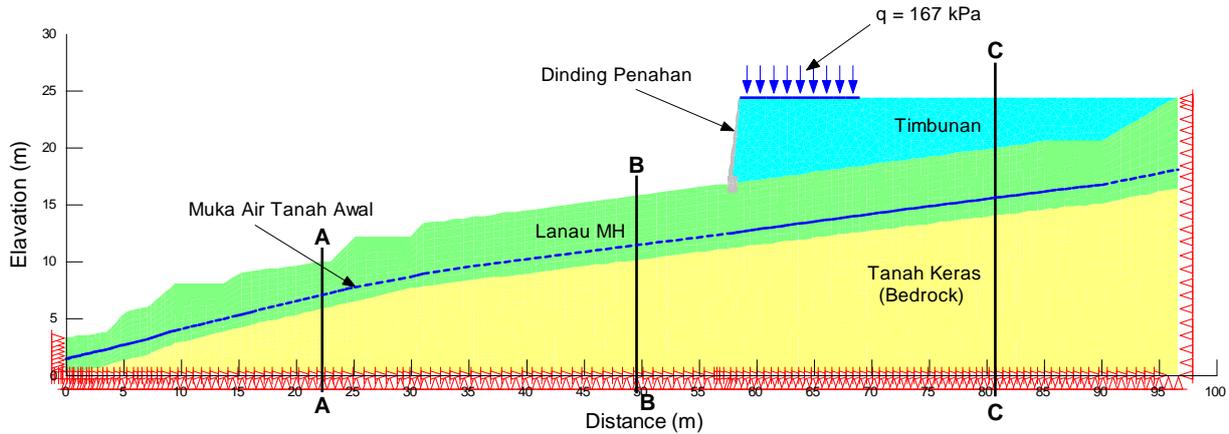
Intensitas Hujan (mm)	Distribusi Hujan Pada Jam ke-			
	1	2	3	4
10	2.64	2.82	2.41	2.12
30	7.92	8.48	7.22	6.37
40	10.56	11.31	9.63	8.5
120.4	31.78	34.04	29	25.57

### *Analisis Deformasi Lereng dengan Pemodelan Elemen Hingga*

Terdapat 3 aspek fundamental dalam pemodelan elemen hingga yaitu *meshing*, *material properties* dan *boundary conditions*. Bentuk dan parameter tanah serta kondisi batas dari geometri lereng yang digunakan dalam simulasi numeris adalah potongan B-B dari penampang lereng hasil uji bor seperti yang diperlihatkan pada Gambar 16 dan Tabel 4 berikut ini.

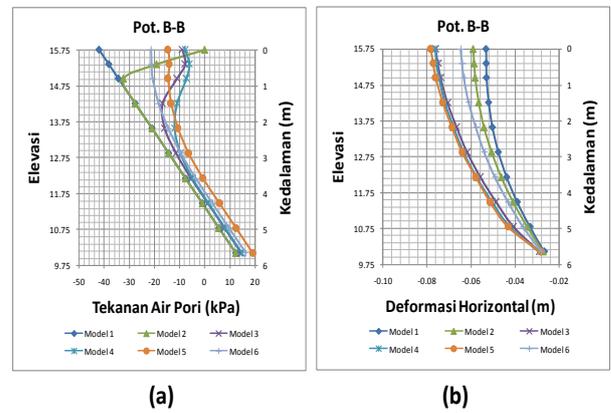
Tabel 4 Data parameter tanah yang digunakan dalam simulasi numeris

Parameter	Jenis Material/Tanah			
	Tanah Keras	Lanau MH	Timbunan	Dinding Penahan
Model Tanah	Elastis Plastis	Elastis Plastis	Elastis Plastis	Linier Elastis
Modulus Elastisitas, $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	50000	7319	10000	100000
Poisson ratio, $\nu$	0.3	0.35	0.3	0.2
Kohesi efektif, $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	50	4	5	0
Sudut gesek efektif, $\phi'$ (°)	15	32	30	0
Sudut gesek akibat pengaruh <i>matrix suction</i> , $\phi_b$ (°)	0	23.66	5	0
Berat tanah, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	16	20	24
Koefisien permeabilitas jenuh air, $k_{sat}$ (m/jam)	$3.6 \times 10^{-10}$	$1.368 \times 10^{-2}$	$7.2 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-13}$

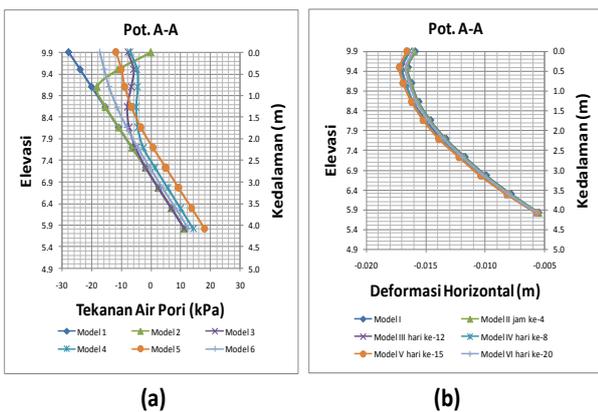


Gambar 16 Penampang melintang dari geometri lereng Sambipitu.

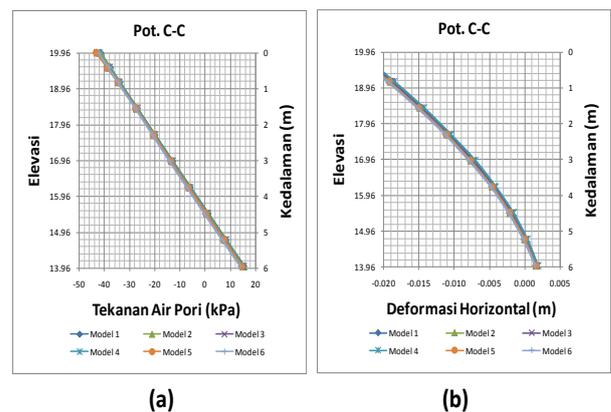
Pengaruh variasi karakteristik hujan dari model I sampai dengan model VI terhadap perubahan tekanan air pori dan deformasi lereng ditunjukkan pada Gambar 17, 18 dan 19 berikut ini yang memperlihatkan hasil perubahan tekanan air pori dan deformasi yang terjadi pada lereng pada setiap akhir dari pemodelan hujan pada titik tinjauan A-A, B-B dan C-C. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa perubahan tekanan air pori dan deformasi terbesar terjadi pada kondisi hujan model V dan pada potongan B-B, yaitu berturut-turut sebesar 33.2kPa dan 25.1mm untuk tekanan air pori dan deformasi horizontal seperti pada Gambar 18.



Gambar 18 Hasil output tekanan air pori dan deformasi akibat hujan pada tinjauan potongan B-B: (a) tekanan air pori, (b) deformasi horizontal.

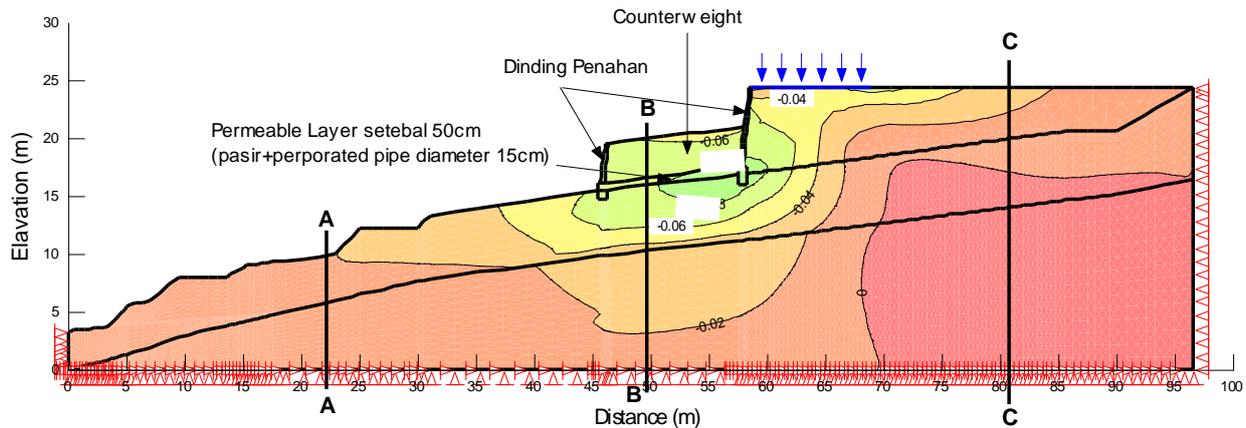


Gambar 17 Hasil output tekanan air pori dan deformasi akibat hujan pada tinjauan potongan A-A: (a) tekanan air pori, (b) deformasi horizontal.



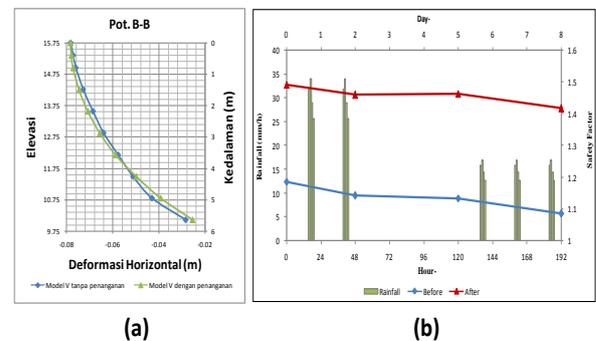
Gambar 19 Hasil output tekanan air pori dan deformasi akibat hujan pada tinjauan potongan C-C: (a) tekanan air pori, (b) deformasi horizontal.

Selanjutnya dilakukan usaha stabilisasi lereng dengan menempatkan *counterweight* berupa



timbunan tanah pada kaki timbunan lama yang bertujuan memperbesar gaya perlawanan terhadap gaya yang melongsorkan yang dilengkapi *permeable layer* (tanah pasir) dengan ketebalan 50cm dan *perforated pipe* (pipa saluran berlubang) berdiameter 15cm pada bagian dasar *counterweight* (Abramson et al., 1996) yang bertujuan mengevakuasi sebagian air terutama air hujan yang berinfiltrasi ke dalam tanah, agar tanah pembentuk lereng tidak menjadi dalam kondisi jenuh air dan ditambah pemasangan dinding penahan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 20 di bawah ini.

Terlihat bahwa pengaruh usaha stabilisasi lereng yang dilakukan dinilai kurang efektif apabila ditinjau dari hasil deformasi yang terjadi akibat hujan model V, namun ditinjau dari faktor aman hasil analisis stabilitas lereng menggunakan SLOPE/W yang dilakukan Handoko (2010), hasil usaha stabilisasi lereng yang dilakukan menunjukkan peningkatan faktor aman (*safety factor*) yang signifikan dari 1.085 pada kondisi tanpa penanganan menjadi 1.417 pada kondisi dengan penanganan sehingga lereng dapat dikatakan dalam kondisi lebih stabil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 21 berikut ini.



Gambar 21 Hasil usaha penanganan longsor: (a) deformasi horizontal dan (b) perubahan faktor aman sebelum dan sesudah penanganan (Handoko, 2010).

## KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah sebagai berikut ini.

- tanah lanau yang berasal dari Sambipitu termasuk golongan *High Plasticity Silt* (MH), sedangkan tanah lempung dari Wates merupakan *High Plasticity Clay* (CH),
- koefisien permeabilitas untuk MH sebesar  $3.86 \times 10^{-4}$  cm/sec dan CH sebesar  $5.78 \times 10^{-4}$  cm/sec dan merupakan lapisan semi kedap air (*semi pervious layer*),
- kohesi efektif untuk MH adalah 4 kPa dan CH sebesar 15.39 kPa, sedangkan sudut gesek dalam efektif untuk MH sebesar  $32^\circ$  dan CH sebesar  $15.63^\circ$ ,
- dalam memprediksi SWCC menggunakan SOILVISION, tanah

- lempung CH dinilai lebih sulit dibandingkan dengan tanah lanau MH,
- e. nilai parameter  $\phi^b$  untuk CH adalah  $5.43^\circ$  dan untuk MH adalah  $5.6^\circ$  pada *matric suction* di bawah 450kPa. Pada analisis deformasi lereng dengan *matric suction* yang terjadi di bawah 50kPa, nilai parameter  $\phi^b$  untuk MH diperoleh sebesar  $23.66^\circ$ ,
  - f. lama hujan retara pada lokasi penelitian ditetapkan sebesar 4 jam/hari,
  - g. perubahan tekanan air pori dan deformasi terbesar terjadi pada kondisi hujan model V dan pada potongan B-B, yaitu berturut-turut sebesar 33.2kPa dan 25.1mm untuk tekanan air pori dan deformasi horizontal.
  - h. dengan usaha penanganan longsor berupa penempatan *counterweight* dan subdrain, terlihat hasil *countermeasures* yang dilakukan menunjukkan peningkatan faktor aman (*safety factor*) yang signifikan dari 1.085 pada kondisi tanpa penanganan menjadi 1.417 pada kondisi dengan penanganan.

## SARAN

Berikut ini saran dan masukan yang diharapkan dapat berguna bagi penelitian lebih lanjut, yaitu:

- a. agar diperoleh data lapangan yang lebih teliti, untuk penelitian selanjutnya akan lebih baik apabila dilengkapi dengan alat pengukuran (*instrumentasi*) di lapangan agar dapat dijadikan sebagai validasi untuk hasil pemodelan,
- b. dalam penelitian yang melakukan pemodelan dengan alat bantu software, akan lebih baik jika sebelum melakukan analisis, sudah mengetahui cara kerja dan keterbatasan dari software tersebut sehingga akan mudah dan cepat dalam menginterpretasi hasil output pemodelan,
- c. agar penelitian berjalan lebih fokus dan tidak memakan waktu yang lama, maka sebaiknya minimalkan parameter yang akan dianalisis karena semakin banyak

- d. parameter, maka memakan waktu lebih lama dan hasilnya kurang optimal,
- d. pada penelitian yang saling berkaitan (*collaboration research*), kerjasama dan koordinasi yang erat dan dinamis dari peneliti yang terlibat menjadi hal yang sangat penting diperlukan agar tidak terjadi kesalahan pemakaian data dan hasil analisis yang digunakan secara bersama-sama.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih, kami sampaikan kepada Dr. Ir. Ahmad Rifa'i dan Prof. Dr. Ir. Kabul Basah Suryolelono, Dip. HE., DEA. atas bimbingan, pengertian dan kepercayaan yang diberikan kepada kami dari awal hingga akhir penelitian ini. Kemudian kepada Handoko, Hidayah dan Yuniar sebagai rekan kerja dan atas kontribusinya dalam penelitian ini. Selanjutnya kepada Pemerintah Prov DIY atas perizinan dan bantuannya dalam memperoleh data hujan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., dan Boyce, G. M., 1996, *Slope Stability and Stabilization Methods*, John Wiley & Sons, Inc, New York
- [2] ASTM, 2003, "Annual Books of ASTM Standard", ASTM, Easton, MD, USA.
- [3] Chen, L., dan M. H. Young, 2006, Green-Ampt Infiltration Model for Sloping Surface, *Water Resources Research*, vol. 42, W07420, doi:10.1029/2005WR004468.
- [4] Fredlund, D. G., and Morgenstern, N.R., 1997, Stress State Variables for Unsaturated Soils, *Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings, American Society of Civil Engineering (GTS)*, **103**: 447-466.
- [5] Fredlund, M. D., 2006, *SoilVision A Knowledge-Based Soils Database User's Manual*, SoilVision Systems Ltd., Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- [6] Handoko, L., 2010, *Determination of Hydro-Mechanical Properties of Unsaturated Soil and Its Application for Slope Stability Analysis*, Thesis S2, Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [7] Hidayah, A.N., 2010, *Pengukuran Nilai Matric Suction Menggunakan Metode Filter Paper pada Lempung Jenuh Sebagian dan Pengaruhnya terhadap Parameter Kuat Geser*, Tugas Akhir S1,

- Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [8] Karnawati, D., 1997, Prediction of Rain-Induced Landsliding by using Hydrodynamik Numerical Model, *Forum Teknik*, Jilid 20 no.1, Januari 1997, Yogyakarta.
- [9] Krahn, J., 2004, *Seepage Modeling with SEEP/W, An Engineering Methodology*, GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alberta, Canada.
- [10] Krahn, J., 2004, *Stress and Deformation Modeling with SIGMA/W, An Engineering Methodology*, GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alberta, Canada.
- [11] Lim T.T., Rahardjo, H., Chang, M.F., and Fredlund, D. G., 1996, Effect of Rainfall on Matric Suction in a Residual soil Slope, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No.4., pp. 618-628.
- [12] Prasetyowati, S.H., 2007, *Analisis Pengaruh Karakteristik Hujan Terhadap Gerakan Lereng*, Thesis S2, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [13] Rifa'i, A., 2002, *Mechanical Testing and Modeling of An Unsaturated Silt, with Engineering Applications*, Ph.D. Desertation, EPFL, Switzerland.
- [14] Subiyanti, H., 2007, *Analisis Kelongsoran Lereng Akibat Pengaruh Tekanan Air Pori di Saluran Induk Kalibawang Kulon Progo*, Thesis S2, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [15] Suryolelono, K.B., 2001, Konsep dan Analisa Penganggulangan Bahaya Tanah Longsor, *Prosiding Studium General Penganggulangan dan Penanganan Bahaya Tanah Longsor*, KMTS UGM, Yogyakarta.
- [16] Suryolelono, K.B., 2003, Bencana Alam Tanah Longsor Perspektif Ilmu Geoteknik, *Pidato Pengukuhan Guru Besar Pada Fakultas Teknik Sipil*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [17] Suryolelono, K.B., dan Rifa'i, A., 2003, Penelitian Keruntuhan Bangunan SPBU di Jalan Wonosari KM 13 Gunung Kidul, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [18] Triatmodjo, B., 2009, *Hidrologi Terapan*, Beta Offset, Yogyakarta.
- [19] Vanapilli, S.K, Fredlund D.G., Putahi D.E., dan Clifton A., 1996, *Model for The Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction* Canadian Geotechnical journal 33:329-392.
- [20] Wijayanti, R., 2006, *Karakterisasi Tanah Jenuh Sebagian dengan Modifikasi Alat Uji Triaksial*, Thesis S2, Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [21] Yuniar, A., 2010, *Pengukuran dan Penentuan Soil Water Characteristic Curve (SWCC) pada*

*Tanah Lanau Jenuh Sebagian Tinjauan terhadap Kuat Geser*, Tugas Akhir S1, Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.