

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

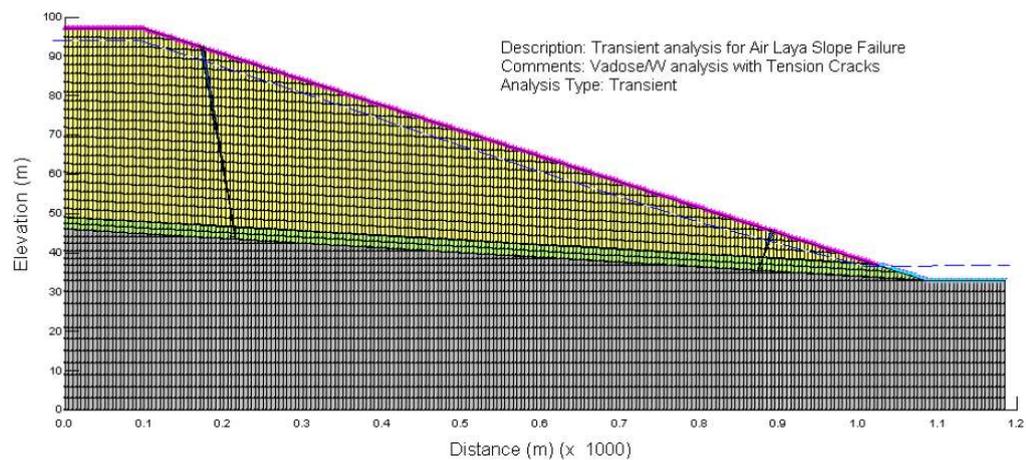
#### 2.1. Pemodelan Numerik Infiltrasi Hujan dan Stabilitas Lereng

Hujan menjadi salah satu faktor utama penyebab ketidakstabilan lereng. Air hujan yang berinfiltrasi ke dalam lereng dapat mengganggu kestabilan lereng. Kajian tentang pengaruh infiltrasi hujan terhadap stabilitas lereng sudah banyak dikaji, diantaranya oleh Rahardjo dkk. (2001), Gofar dkk. (2006), Lee dkk. (2009), Muntohar dkk. (2013) dan Gofar dan Lee (2008). Kajian tentang pengaruh karakteristik hujan terhadap pergerakan dan stabilitas lereng di Saluran Induk Kalibawang km 15+900 sendiri sudah dikaji oleh Haryanti dkk. (2010) dan Subiyanti dkk. (2015). Selain kajian terhadap hujan, penelitian juga dilakukan terhadap pengaruh muka air tanah pada stabilitas lereng seperti yang dikaji oleh Rahardjo dkk. (2010) dan Muntohar dan Saputro (2014). Dalam pemodelan numerik terdapat dua metode analisis infiltrasi dan stabilitas lereng yaitu *uncoupled* dan *coupled*. Hasil pemodelan kedua metode tersebut memberikan hasil yang berbeda seperti yang dikaji oleh Qi dan Vanapalli (2015), dan Xue dkk. (2016).

Rahardjo dkk. (2001) mengkaji tentang kejadian longsor akibat hujan anteseden yang menyebabkan lebih dari 20 kejadian longsor di kampus Nanyang Technological University. SEEP/W digunakan untuk menganalisis perubahan tekanan air pori dan untuk analisis stabilitas lereng menggunakan SLOPE/W dengan menggunakan metode keseimbangan limit equilibrium (*limit equilibrium analysis*). Analisis dilakukan pada berbagai kasus hujan, diantaranya pada 15 November 1993 (kasus 1), 12 November 1994 (kasus 2) dan 26 Februari 1995 (kasus 3). Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa terjadi peningkatan muka air tanah selama terjadi hujan dan menyebabkan meningkatnya tekanan air pori dan menurunnya nilai *suction* pada lereng. Sebagai hasilnya menyebabkan nilai faktor aman menurun selama hujan terjadi.

Gofar dkk. (2006) mengkaji pengaruh infiltrasi-rembesan terhadap stabilitas tanah pada lereng di Air Laya Indonesia. Analisis infiltrasi-rembesan dianalisis menggunakan VADOSE/W dan SLOPE/W digunakan untuk analisis stabilitas lereng. Pemodelan dilakukan dengan durasi 589 hari (21 April 2001 sampai 1

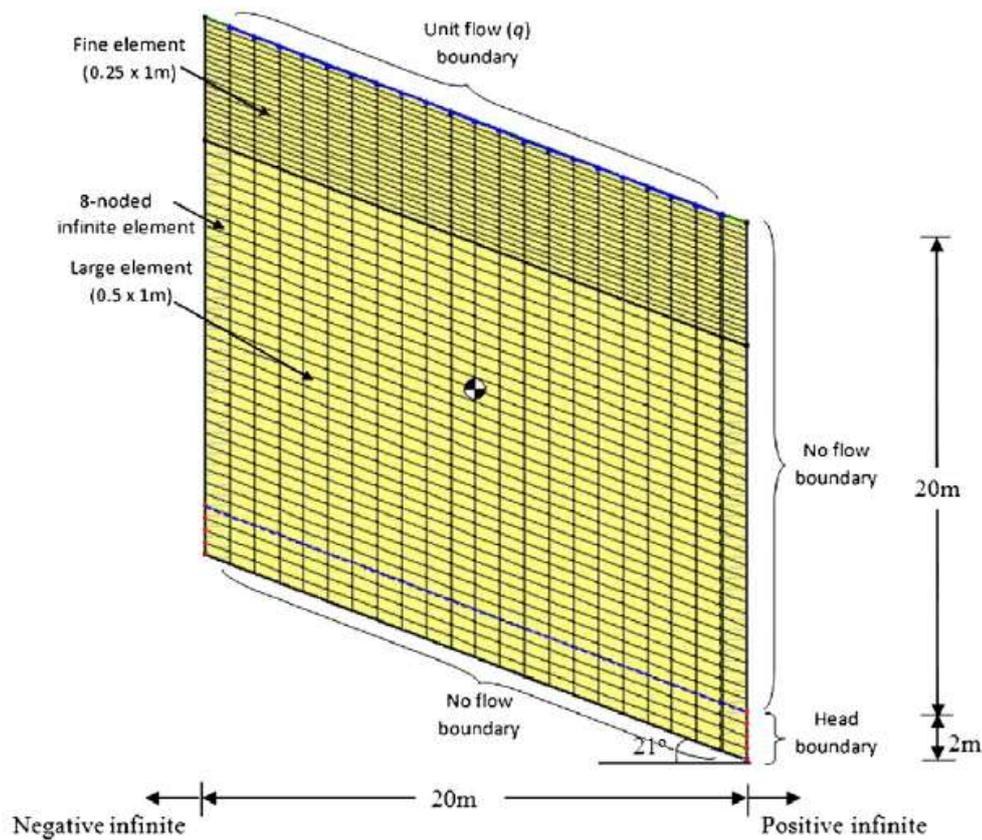
Desember 2001). Jumlah *mesh* pada pemodelan ini sebanyak 6887 elemen dengan tinggi 97 m dan panjang lereng 1185 m. Model yang digunakan pada pemodelan ini ditunjukkan oleh Gambar 2. 1. Nilai *suction* awal di permukaan lereng dibatasi dengan berdasarkan data tensiometer pada kedalaman 1,5 m yang kemudian dilakukan ekstrapolasi. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa penyebab utama longsor adalah terbentuknya retakan pada permukaan tanah yang memiliki potensi penyusutan yang tinggi setelah musim kemarau. Sehingga memberikan celah untuk air masuk ke dalam tanah dan menyebabkan peningkatan tekanan air pori. Nilai tekanan air pori terbesar terjadi pada tanggal kejadian longsor, ini membuktikan bahwa infiltrasi hujan dapat meningkatkan tekanan air pori dalam lereng dan mengurangi nilai *suction* pada zona tak jenuh air (di atas muka air tanah) sehingga menyebabkan longsor.



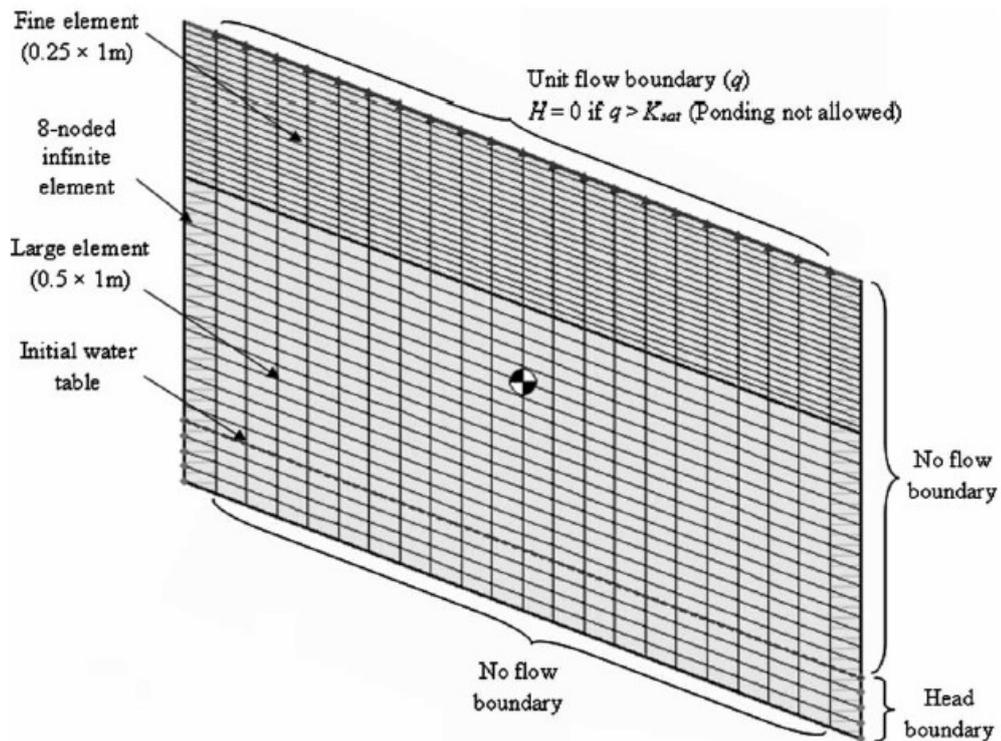
Gambar 2. 1 Model lereng pada VADOSE/W (Gofar dkk., 2006).

Lee dkk. (2009) membuat pemodelan sederhana untuk mengkaji efek infiltrasi air hujan terhadap stabilitas lereng. Infiltrasi-rembesan dianalisis dengan menggunakan SEEP/W dan untuk analisis stabilitas menggunakan SLOPE/W. Lereng dimodelkan sebagai lereng tak-hingga dengan batasan-batasan yang diterapkan pada pemodelan ditunjukkan pada Gambar 2. 2. Pemodelan dilakukan untuk berbagai jenis tanah yang ada di semenanjung Malaysia diantaranya *sand-gravel*, *silty gravel*, *sandy silt*, dan *silt*. Nilai *matric suction* pada kondisi awal lereng dibatasi berdasarkan pengukuran *suction* di lapangan. Pembatasan awal dilakukan karena jika nilai *matric suction* berdasarkan tekanan hidrostatik dari muka air tanah, maka akan menjadi sangat besar hingga mencapai 196,2 kPa (muka

air tanah berada 20 meter di bawah permukaan tanah). Dalam penelitian ini, *matric suction* pada lereng dibatasi 10 kPa, 23 kPa, 30 kPa dan 50 kPa masing-masing untuk tanah *sand-gravel*, *silty gravel*, *sandy silt*, dan *silt*. Kajian serupa juga dilakukan oleh (Gofar dan Lee, 2008). Model dan batasan-batasan yang diterapkan pada penelitian ditunjukkan Gambar 2. 3 Pada penelitian ini, nilai *suction* pada permukaan lereng dibatasi 10, 25 dan 70 kPa untuk masing-masing tanah pasir, pasir berlanau dan lempung. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa intensitas dan durasi hujan sangat berpengaruh terhadap distribusi *suction* di tanah. Lereng yang terdiri dari tanah dengan nilai permeabilitas besar seperti pasir sangat mudah mengalami kegagalan pada kedalaman yang dangkal. Untuk lereng yang terdiri dari tanah dengan nilai permeabilitas kecil seperti lempung membutuhkan durasi hujan yang lebih panjang untuk mengalami kegagalan.

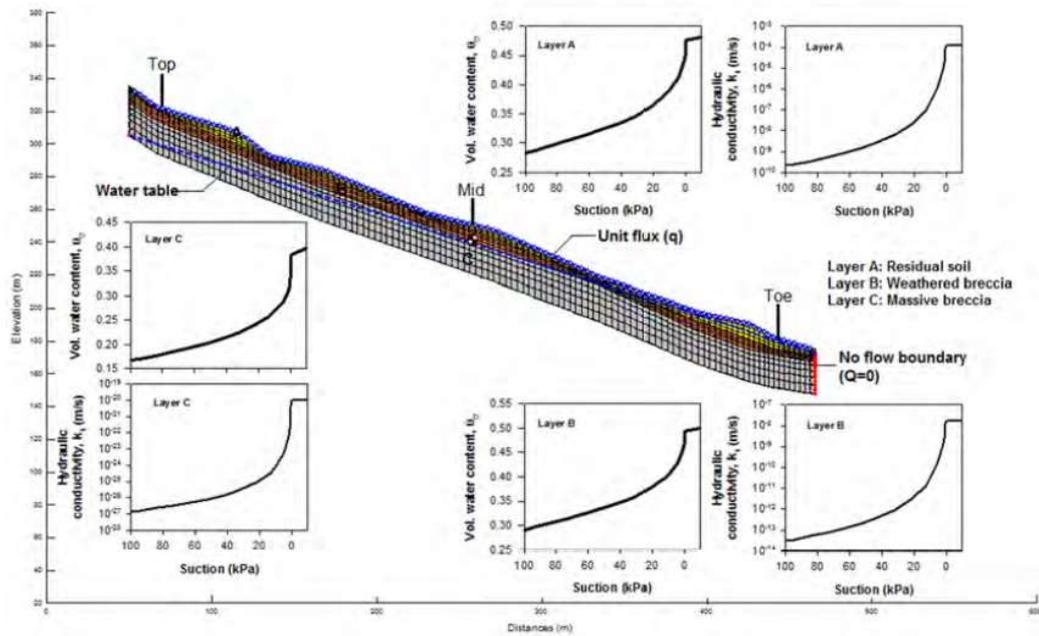


Gambar 2. 2 Model lereng tak hingga dan batas-batas yang diterapkan pada model (Lee dkk., 2009).



Gambar 2. 3 Model infiltrasi dan batas-batas yang diterapkan pada pemodelan (Gofar dan Lee, 2008).

Muntohar dkk. (2013) mengkaji stabilitas tanah akibat rembesan air hujan pada lereng di Dusun Kedungrong, Kabupaten Kulonprogo, Yogyakarta. Analisis rembesan dianalisis menggunakan SEEP/W. Untuk mengetahui stabilitas lereng akibat efek dari rembesan air hujan dilakukan analisis dengan menggunakan SLOPE/W. Pada penelitian ini hujan dimodelkan dengan batas hidrolis *unit flux* ( $q$ ). Rembesan dimodelkan dengan mengaktifkan kondisi batas *seepage face review* di permukaan lereng. Gambar 2.4 menunjukkan model dan kondisi batas yang diterapkan pada lereng. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa rembesan menyebabkan peningkatan muka air tanah dan tekanan air pori pada lereng.



Gambar 2. 4 Model infiltrasi lereng (Muntohar dkk., 2013).

Penelitian pergerakan dan stabilitas lereng di Saluran Induk Kalibawang km 15+900 dilakukan oleh Haryanti dkk. (2010) dan Subiyanti dkk. (2015). Haryanti dkk. (2010) memodelkan lereng pada Saluran Induk Kalibawang km 15+900, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta untuk mengkaji pengaruh dari karakteristik hujan terhadap gerakan lereng. Analisis rembesan dimodelkan secara numeris menggunakan SEEP/W dan deformasi lereng menggunakan SIGMA/W. Berdasarkan hasil pemodelan, dapat disimpulkan bahwa hujan deras dengan durasi pendek tidak berpengaruh secara signifikan pada pergerakan lereng hal ini disebabkan durasi yang singkat sehingga hujan belum berinfiltrasi secara baik dalam tanah. Karakteristik hujan yang menyebabkan gerakan atau deformasi lereng terbesar adalah hujan dengan durasi panjang hal ini disebabkan hujan dengan durasi panjang menyebabkan air memiliki waktu untuk berinfiltrasi ke dalam tanah. Subiyanti dkk. (2015) mengkaji pengaruh perubahan tekanan air pori terhadap kelongsoran lereng di Saluran Induk Kalibawang km 15+900, Kabupaten Kulon Progo. SEEP/W digunakan untuk menganalisis perubahan tekanan air pori dan SLOPE/W untuk menganalisis stabilitas lereng. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hujan normal berdurasi panjang lebih berpengaruh terhadap perubahan tekanan air pori dari pada hujan deras berdurasi pendek. Hujan normal yang berlangsung lama, pada tanah-tanah berbutir halus menyebabkan naiknya muka air

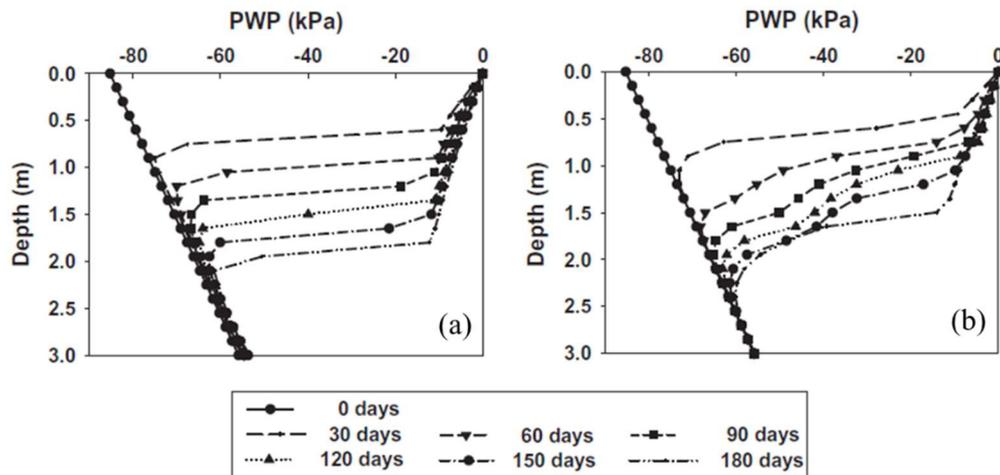
tanah dan menyebabkan naiknya tekanan air pori. Ketika tanah jenuh akibat infiltrasi, maka kekuatan geser tanah hilang, sehingga kemungkinan besar terjadi longsor.

Kajian tentang pergerakan lereng akibat hujan juga dikaji oleh Pramusandi dkk. (2015). Pemodelan dilakukan pada lereng yang berada di Sambipitu, Wonosari, Yogyakarta. Analisis rembesan dianalisis dengan menggunakan SEEP/W dan pergerakan lereng dengan menggunakan SIGMA/W. Terdapat 6 jenis hujan yang dimodelkan pada penelitian ini. Hasil menunjukkan hujan dengan intensitas mendekati nilai permeabilitas jenuh dari tanah memberikan dampak yang lebih besar terhadap peningkatan tekanan air pori dan deformasi dari pada hujan normal dengan durasi panjang.

Pemodelan deformasi lereng dengan SIGMA/W memungkinkan untuk menggunakan tipe analisis *coupled*. Pada tipe analisis ini, memungkinkan untuk menganalisis persamaan rembesan dan *stress-deformation* dianalisis secara berurutan (Geo-Slope, 2010). Analisis *coupled* memungkinkan untuk menyelesaikan persamaan hanya dengan menggunakan SIGMA/W tanpa perlu menggunakan SEEP/W untuk memodelkan analisis rembesan. Pemodelan dengan menggunakan analisis ini dapat memberikan hasil yang berbeda dengan menggunakan analisis *uncoupled*. Penelitian tentang perbedaan dari hasil pemodelan dengan menggunakan analisis *coupled* dan *uncoupled* dikaji oleh Qi dan Vanapalli (2015) dan Xue dkk. (2016).

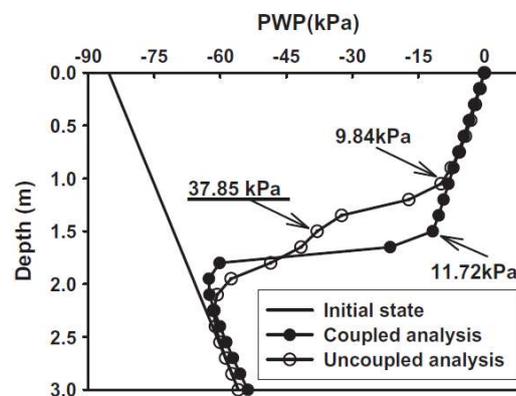
Qi dan Vanapalli (2015) mengkaji tentang hujan yang menyebabkan kegagalan pada lereng tanah ekspansif. Lereng dimodelkan dengan menggunakan SEEP/W dan SIGMA/W untuk menganalisis rembesan dan stabilitas lereng. Pemodelan lereng menggunakan dua tipe analisis yang berbeda yaitu *coupled analysis* dan *uncoupled analysis* untuk mengetahui perbedaan dari dua analisis ini. Pemodelan menunjukkan adanya perbedaan antara hasil analisis menggunakan *coupled analysis* dan *uncoupled analysis*. Gambar 2. 5 menunjukkan perbedaan hasil perhitungan tekanan air pori dari analisis *coupled* dan *uncoupled*. Analisis dengan menggunakan analisis *coupled* memberikan bentuk profil yang sangat berbeda dengan analisis *uncoupled*. Analisis *coupled* memberikan transisi yang

lebih tajam dibandingkan analisis *uncoupled*. Analisis *uncoupled* membutuhkan waktu yang lebih panjang untuk pembasahan dibandingkan analisis *coupled*.



Gambar 2. 5 Profil perubahan tekanan air pori (a) pada *coupled analysis*, (b) pada *uncoupled analysis* (Qi dan Vanapalli, 2015).

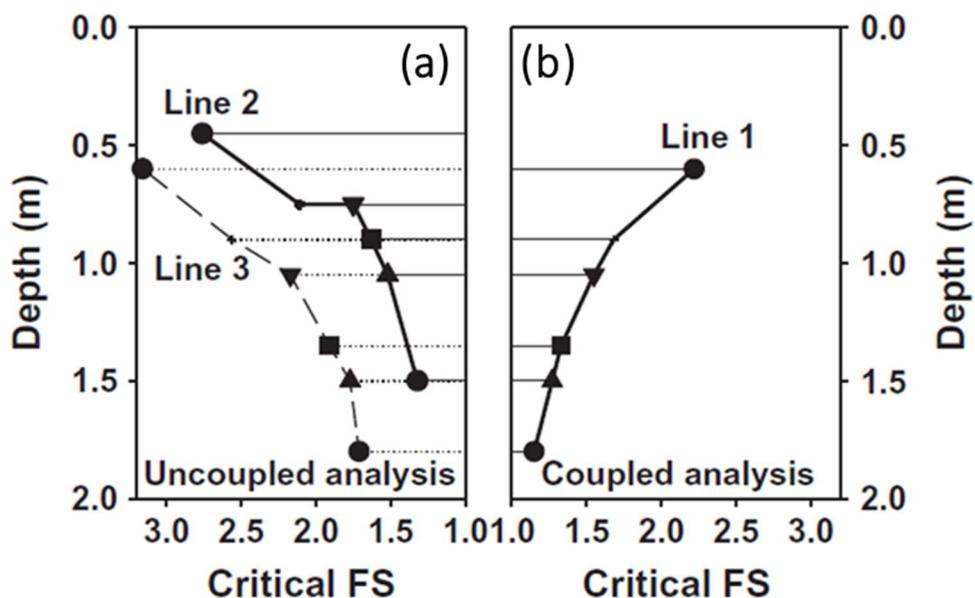
Perbedaan profil tekanan air pori disebabkan perbedaan dari sifat mekanik tanah dengan *suction*. Pada analisis *coupled* terjadi perubahan volume yang besar dan menyebabkan perubahan *suction* yang besar pula dibandingkan dengan *uncoupled analysis*. Sebagai hasilnya pembasahan pada *coupled analysis* terjadi lebih cepat dan dapat mencapai kedalaman yang lebih besar dibandingkan *uncoupled analysis*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 6, pada kedalaman 1,5 m dengan durasi yang sama nilai *suction* pada analisis *coupled* mencapai 11,72 kPa sedangkan pada analisis *uncoupled* hanya mencapai 37,85 kPa.



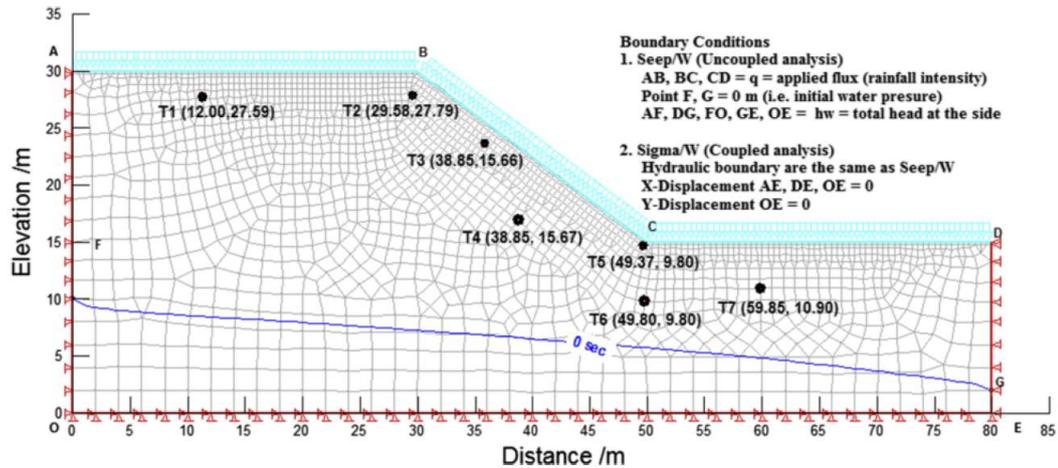
Gambar 2. 6 Perbandingan nilai *suction* pada analisis *coupled* dan *uncoupled* (Qi dan Vanapalli, 2015).

Nilai faktor aman (FS) dari analisis *coupled* lebih rendah dibandingkan dari analisis *uncoupled*. Dengan durasi hujan yang sama nilai FS untuk analisis *coupled* pada kedalaman 1,5 m sebesar 1,23 dan pada analisis *uncoupled* nilai FS pada kedalaman 1,05 m sebesar 1,53 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 7. Perbedaan ini disebabkan oleh nilai *suction* yang berbeda pada analisis *coupled* dan *uncoupled* seperti yang dijelaskan diatas. Nilai FS yang lebih rendah pada kedalaman yang lebih dalam dari hasil analisis *coupled* menunjukkan bahwa perilaku tanah pada analisis *coupled* memiliki efek buruk pada stabilitas tanah sehingga perlu dipertimbangkan dalam analisis stabilitas lereng.

Xue dkk. (2016) mengkaji hujan dengan durasi lama pada stabilitas lereng dengan menggunakan *coupled analysis* dan *uncoupled analysis*. Lereng dimodelkan dengan menggunakan SEEP/W dan SIGMA/W. Batasan yang diterapkan pada pemodelan ditampilkan pada Gambar 2. 8. Penelitian menunjukkan bahwa perbedaan utama antara *coupled* dan *uncoupled* analisis adalah efek dari deformasi terhadap analisis rembesan dan sebaliknya. Hasil dari analisis deformasi dan analisis rembesan saling mempengaruhi pada kinerja lereng, terutama untuk stabilitas lereng.

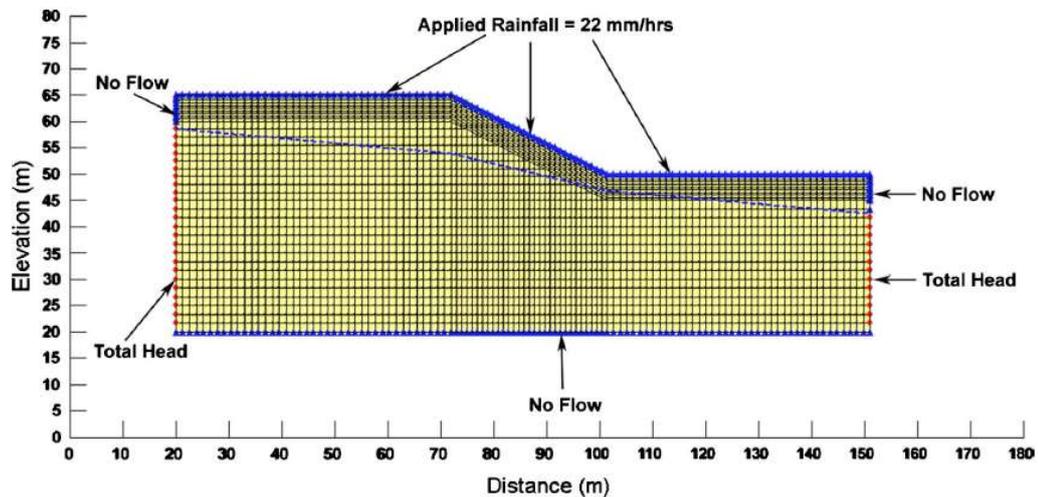


Gambar 2. 7 Perbandingan nilai FS pada (a) analisis *coupled*, (b) *uncoupled* (Qi dan Vanapalli, 2015).



Gambar 2. 8 Model lereng dan batas-batas yang diterapkan (Xue dkk., 2016)

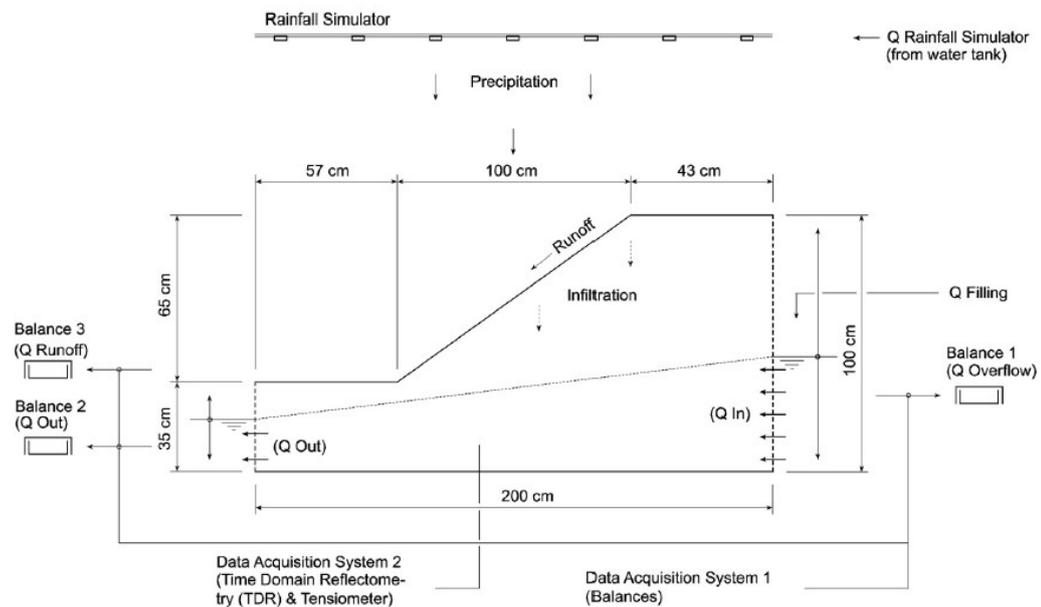
Rahardjo dkk. (2010) mengkaji pengaruh posisi muka air tanah terhadap stabilitas lereng selama hujan. Tiga posisi muka air tanah (dalam kondisi kering, setengah basah dan basah) dengan empat intensitas hujan yang berbeda dimodelkan dalam kajian ini. Model lereng dan kondisi batas yang diterapkan pada pemodelan ditunjukkan pada Gambar 2. 9. Hasil kajian menunjukkan muka air tanah dekat permukaan lereng tidak berpengaruh secara signifikan pada perubahan faktor aman karena perubahan yang relatif kecil pada *matrix suction*.



Gambar 2. 9 Model lereng yang dianalisis (Rahardjo dkk., 2010).

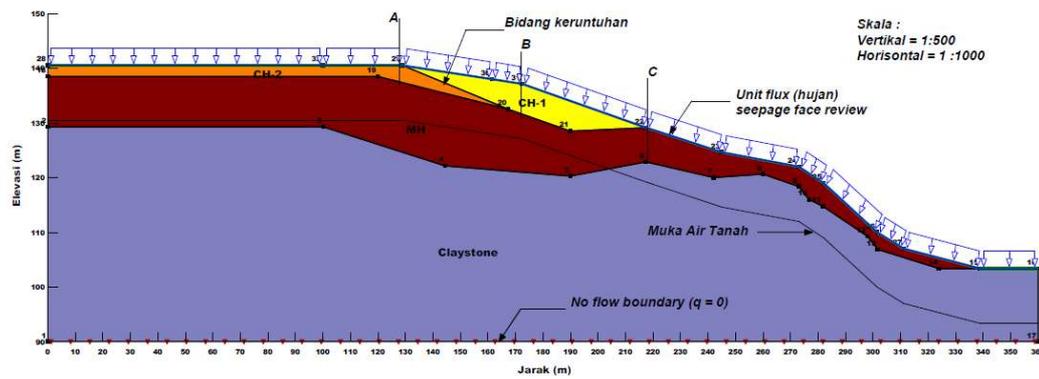
Schnellmann dkk. (2010) memodelkan lereng tak jenuh dalam pemodelan laboratorium dan mengkaji pengaruh peningkatan muka air tanah pada model tersebut. Dalam pemodelan ini, tanah ditempatkan kedalam sebuah kotak dengan

panjang 2,40 m, tinggi 1,80 m dan tebal 0,60 m. Gambar 2. 10 menunjukkan skema dari kotak pengujian pada pemodelan ini. Selain menggunakan pemodelan laboratorium, analisis numeris juga dilakukan untuk mensimulasikan infiltrasi pada lereng. Hasil menunjukkan terdapat kecocokan yang baik antara hasil pemodelan fisik dan analisis numerik.



Gambar 2. 10 Skema dari kotak pengujian (Schnellmann dkk., 2010).

Penelitian tentang pengaruh muka air tanah terhadap stabilitas lereng di Saluran Induk Kalibawang km 15+900 dikaji oleh Muntohar dan Saputro (2014). Pada penelitian ini, analisis rembesan dimodelkan secara numerik dengan menggunakan SEEP/W dan stabilitas lereng dengan menggunakan SLOPE/W. Model lereng dan kondisi batas yang dimodelkan pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 2. 11. Berdasarkan hasil penelitian, penurunan nilai *suction* dan faktor aman lereng lebih cepat terjadi pada muka air tanah yang lebih dekat dengan permukaan lereng.



Gambar 2.11 Model lereng yang dimodelkan (Muntohar dan Saputro, 2014).

## 2.1. Dasar Teori

### 2.2.1. Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah adalah gaya atau tegangan dalam yang dibutuhkan untuk memberikan perlawanan atau menahan geser yang diakibatkan oleh beban atau tegangan yang bekerja pada tanah (Muntohar, 2009). Dalam bidang geoteknik pengertian terhadap kuat geser tanah sangat penting untuk menganalisis permasalahan stabilitas tanah seperti kuat dukung, stabilitas lereng, dan tekanan lateral pada struktur penahan tanah. Menurut (Wesley, 2012), kuat geser tanah berubah pada jenis tanah tertentu. Umumnya tanah di kedalaman yang lebih besar memiliki kekuatan yang lebih kuat dibandingkan pada permukaan, hal ini karena tegangan sangat berpengaruh terhadap kuat geser tanah.

Selain faktor kedalaman ada beberapa faktor lain yang mempengaruhi kuat geser tanah. Faktor-faktor itu seperti komposisi mineral penyusun tanah, kekasaran permukaan butir tanah, bentuk butiran tanah, gradasi partikel tanah dan kerapatan tanah. Faktor-faktor lingkungan juga dapat mempengaruhi kuat geser tanah, seperti jenis pengujian, cara dan perlakuan selama pengujian kuat geser tanah (Muntohar, 2009).

#### a. Teori Keruntuhan Mohr-Coulumb

Menurut Mohr dalam Muntohar (2009) kombinasi dari tegangan normal dan tegangan geser kritis merupakan penyebab terjadinya keruntuhan pada suatu bahan, bukan dari salah satu tegangan normal maksimum dan tegangan geser maksimum. Hubungan fungsi antara tegangan

normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya, dinyatakan menurut Persamaan 2. 1.

$$\tau = f(\sigma) \quad (2. 1)$$

dimana :

$\tau$  = tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan,

$\sigma$  = tegangan normal pada saat kondisi keruntuhan atau kegagalan.

Coulumb dalam Muntohar (2009) menyebutkan bahwa apabila tanah diberi sebuah beban maka akan ditahan oleh:

- 1) kohesi tanah yang tergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tetapi tidak dipengaruhi oleh tegangan vertikal yang bekerja pada bidang gesernya,
- 2) gesekan antar butiran tanah yang nilainya berbanding lurus dengan tegangan vertikal pada bidang gesernya.

Atau dapat dirumuskan dalam Persamaan 2. 2

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2. 2)$$

dengan:

$\tau$  = kuat geser tanah,

$\sigma$  = tegangan normal total pada bidang runtuh,

$c$  = kohesi tanah,

$\phi$  = sudut gesek tanah.

Muntohar (2009) menyebutkan bahwa untuk tanah dalam keadaan jenuh air, tegangan akan ditahan oleh butiran tanah, oleh karena itu kuat geser tanah ditentukan oleh tegangan efektif yaitu:

$$\tau = c + (\sigma - u_w) \tan \phi \quad (2. 3)$$

karena,

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2. 4)$$

maka,

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2. 5)$$

dengan:

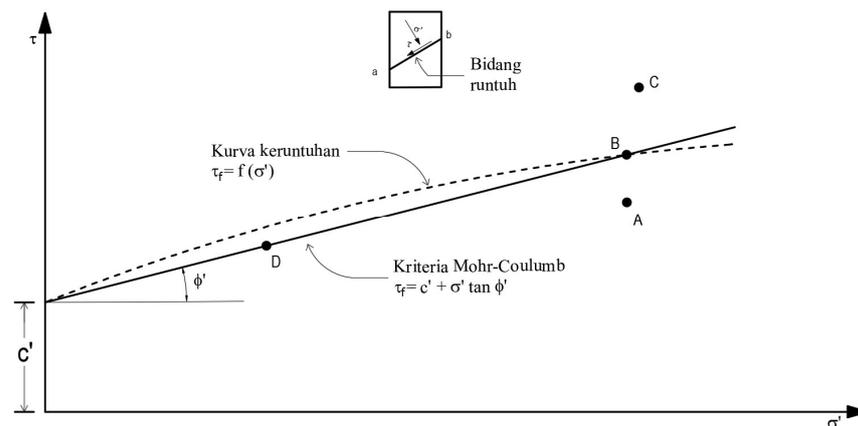
$\tau$  = kuat geser tanah,

$\sigma'$  = tegangan normal efektif pada bidang runtuh,

$c'$  = kohesi tanah efektif,

$\phi'$  = sudut gesek tanah efektif.

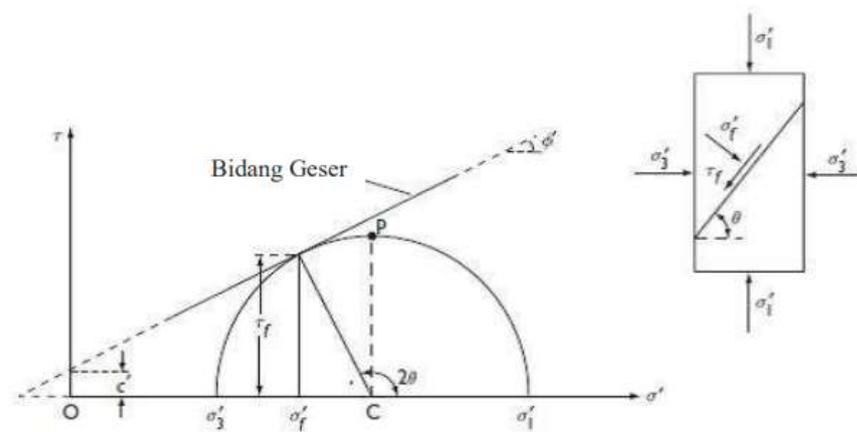
Dalam Muntohar (2009) teori keruntuhan Mohr-Coulumb tersebut dapat dijelaskan melalui Gambar 2. 12. Jika tegangan normal efektif dan tegangan geser tanah pada suatu bidang runtuh mencapai titik A maka keruntuhan geser belum terjadi walaupun kombinasi tegangan pada titik A lebih besar dari pada titik D (berada pada kurva keruntuhan). Keruntuhan geser akan terjadi jika tegangan normal efektif dan tangan geser tanah mencapai titik B atau sembarang titik selama masih pada bidang keruntuhan. Keadaan pada titik C tidak akan terjadi, karena sebelum tegangan mencapai titik tersebut sudah terjadi keruntuhan.



Gambar 2. 12 Kriteria kegagalan Mohr-Coulumb (Muntohar, 2009).

#### b. Lingkaran Mohr Kuat Geser Tanah

Saat keruntuhan terjadi, kuat geser tanah juga bisa dinyatakan dalam tegangan-tegangan efektif  $\sigma_1'$  (tegangan utama mayor efektif) dan  $\sigma_3'$  (tegangan utama minor efektif) (Hardiyatmo, 2012). Gambar 2. 13 menunjukkan lingkaran mohr dalam bentuk lingkaran tegangan, dengan koordinat  $\tau$  dan  $\sigma'$ .



Gambar 2. 13 Lingkaran Mohr (Hardiyatmo, 2012).

Pada saat kegagalan, persamaan dari tegangan geser ( $\tau_f$ ) dan tegangan normal ( $\sigma_f$ ) yang terjadi pada bidang geser ditunjukkan oleh Persamaan (2. 6) dan (2. 7).

$$\tau_f = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin 2\theta \quad (2. 6)$$

$$\sigma_f = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cos 2\theta \quad (2. 7)$$

dengan  $\sigma'_1$  dan  $\sigma'_3$  merupakan tegangan utama mayor dan tegangan utama minor efektif pada saat terjadi kegagalan. Sudut teoritis yang terbentuk antara bidang horizontal dengan bidang runtuh ( $\theta$ ) dapat diketahui besarnya dengan menggunakan Persamaan 2. 8.

$$\theta = 45 + \frac{\phi'}{2} \quad (2. 8)$$

Besarnya nilai parameter kuat geser, dapat ditentukan dari persamaan:

$$\sin \phi' = \frac{\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{c \cot \phi' + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)} \quad (2. 9)$$

dan

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3) = 2c' \cos \phi' + (\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin \phi' \quad (2. 10)$$

Persamaan 2.10 digunakan untuk kriteria keruntuhan atau kegagalan Mohr-Coulomb.

Muntohar (2009) menyebutkan bahwa untuk menggambarkan kondisi tegangan dapat juga digambarkan dalam koordinat  $p'$  dan  $q'$ , dimana  $p'$  merupakan tegangan geser dan  $q'$  adalah rata-rata dari tegangan-tegangan utama yang dinyatakan sebagai:

$$p' = \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3') \quad (2.11)$$

$$q' = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3') \quad (2.12)$$

Tegangan pada titik d berada pada suatu garis lurus yang merupakan kurva selubung keruntuhan yang telah dimodifikasi yang mana dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{(\sigma_1' - \sigma_3')}{2} = a + \frac{(\sigma_1' - \sigma_3')}{2} \tan \alpha \quad (2.13)$$

dengan  $a$  dan  $\alpha$  adalah parameter kuat geser tanah modifikasi. Untuk itu parameter kuat geser tanah  $c'$  dan  $\phi'$  ditentukan dengan persamaan:

$$\phi' = \sin^{-1}(\tan \alpha) \quad (2.14)$$

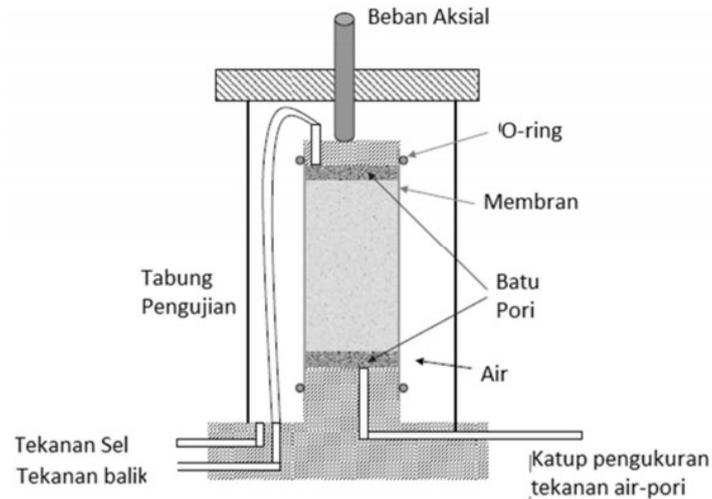
$$c' = \frac{a}{\cos \phi'} \quad (2.15)$$

c. Pengujian Triaksial Metode *Consolidated Undrained* (CU)

Pengujian kuat geser yang sering digunakan dan cocok untuk tanah kohesif dan tanah granular serta batuan adalah pengujian triaksial (Muntohar, 2009). Diagram skematik alat untuk pengujian triaksial dapat dilihat pada Gambar 2. 14. Contoh tanah pada pengujian ini berbentuk silinder dengan diameter 38,1 (1,5 in) dan tinggi 76,2 mm (3 in), secara umum ukuran diameter benda uji dapat lebih besar dengan tinggi benda uji dua kali diameternya.

Dalam Hardiyatmo (2012), pada pengujian dengan metode terkonsolidasi-tak terdrainase, tekanan sel dengan besar tertentu diterapkan pada benda uji dengan mengizinkan air keluar benda uji sampai konsolidasi selesai. Menurut Muntohar (2009) untuk mengetahui peningkatan air pori yang terjadi dalam benda uji akibat penerapan tegangan sel ini dapat digunakan koefisien tekanan air pori (*B-value*) yang mana parameter ini

tidak memiliki satuan (*non-dimensional parameter*). Berdasarkan ASTM D 4767 (2004), *B-value* dapat diperhitungkan dengan menggunakan Persamaan 2. 16.



Gambar 2. 14 Diagram skematik alat uji triaksial (Muntohar, 2009).

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (2. 16)$$

dimana:

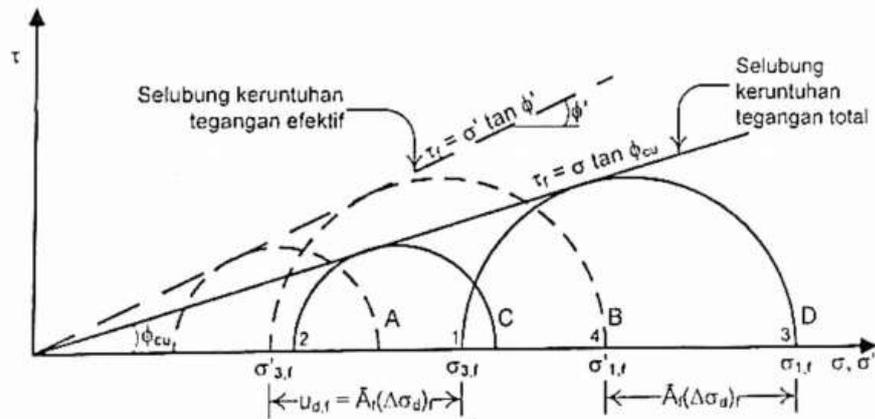
$\Delta u$  = perubahan tekanan pori pada benda uji saat katup drainase pada benda uji ditutup.

$\Delta \sigma_3$  = perubahan tekanan pada *chamber*

Setelah tahap konsolidasi selesai, benda uji dibebani tegangan deviatorik sampai mengalami keruntuhan. Pada pengujian dengan menggunakan metode ini, akan terdapat tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure*) dalam benda uji sehingga perlu dilakukan pengukuran tekanan air pori selama pengujian.

Pada pengujian ini, setelah proses konsolidasi selesai, tekanan air pori,  $u_c = 0$  karena air dibiarkan mengalir keluar benda uji. Maka perlawanan geser tanah yang terjadi hanya ditahan oleh kohesi dan gesekan antar partikel tanah tanpa adanya perlawanan dari tekanan air pori. Maka

parameter kuat geser tanah yang didapat pada pengujian ini merupakan parameter kuat geser tanah efektif. Tipikal selubung tegangan efektif hasil uji triaksial dengan metode terkonsolidasi-takterdrainasi dapat dilihat pada Gambar 2. 15.



Gambar 2. 15 selubung keruntuhan tegangan total dan tegangan efektif pada uji triaksial terkonsolidasi-tak terdrainase. (Muntohar, 2009)

d. Kuat Geser Tanah Tidak Jenuh Air

Kuat geser tanah tidak jenuh air dapat dihitung dengan teori tegangan efektif seperti pada Persamaan 2. 17.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2. 17)$$

maka,

$$\tau_f = c' + \left[ (\sigma - u_a)_f + \chi(u_a - u_w)_f \right] \tan \phi' \quad (2. 18)$$

dengan:

- $\tau$  = kuat geser tanah,
- $c'$  = kohesi efektif tanah,
- $\sigma$  = tegangan total tanah,
- $\phi'$  = sudut geser internal tanah,
- $\chi$  = fungsi dari derajat kejenuhan.

Nilai  $\chi$  adalah parameter yang ditentukan secara eksperimental, yang mempunyai hubungan langsung dengan derajat kejenuhan tanah. Penentuan kuat geser dengan berdasarkan tegangan efektif pada persamaan diatas relatif sulit untuk

diterapkan. Fredlund dkk. dalam Muntohar (2009) memberikan persamaan untuk menjelaskan hubungan kuat geser tahan tidak jenuh air dengan dua parameter tegangan yang ditunjukkan pada Persamaan 2. 19.

$$\tau = \left[ c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \right] \quad (2. 19)$$

dengan:

$(\sigma - u_a)$  = tegangan normal,

$(u_a - u_w)$  = *matric suction*,

$\phi'$  = sudut gesek internal,

$\phi^b$  = sudut gesek internal yang berhubungan dengan  $(u_a - u_w)$ .

Vanapalli dkk. (1996) mengusulkan persamaan baru. Persamaan tersebut berhubungan dengan kurva karakteristik air tanah (*Soil-Water Characteristic Curve*) seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2. 20.

$$\tau = \left[ c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' \right] + (u_a - u_w) \left[ \tan \phi' \left( \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (2. 20)$$

dengan:

$\theta_w$  = kadar air volumetrik,

$\theta_s$  = kadar air volumetrik pada kondisi jenuh air,

$\theta_r$  = kadar air volumetrik residu.

### 2.2.2. *Soil Suction*

*Soil suction* dapat diartikan sebagai potensi dari tanah untuk menyerap air (Jotisankasa, 2006). *Soil suction* juga sering disebut tekanan air pori negatif, yang dikontrol oleh tarikan permukaan pada batas antara udara dan air di dalam rongga pori dan dipengaruhi oleh ukuran butiran tanah. *Soil suction* dapat dirumuskan sebagai:

$$s = u_a - u_w \quad (2. 21)$$

dengan:

$u_a$  = tekanan udara,

$u_w$  = tekanan air pori.

Keadaan tanah yang mengalami *soil suction* atau tekanan air pori negatif berada pada tanah tak jenuh air atau jenuh sebagian (*partial saturated*). Pada keadaan ini tekanan air pori ( $u_w$ ) akan lebih kecil dari pada tekanan udara ( $u_a$ ) akibat adanya tegangan permukaan (Muntohar, 2009). *Soil suction* memiliki peranan penting dalam kuat geser tanah tak jenuh air. Jika *soil suction* meningkat maka gaya tarik permukaan akan meningkat pula yang mana partikel-partikel tanah akan terikat lebih kuat sehingga akan memperbesar kuat geser tanah. Jika terjadi hujan pada tanah tak jenuh air, maka tekanan air pori akan meningkat sehingga *soil suction* akan berkurang dan memperkecil kuat geser tanah. Akibat selanjutnya, bila terjadi pada lereng akan menyebabkan longsor.

Banyak metode yang dapat digunakan untuk mengukur *soil suction*, di laboratorium diantaranya metode *tensiometer*, *dewpoint potentiometer*, *osmotic method* dan *filter paper* (Shen dkk., 2013). Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah metode *filter paper*, metode ini dipilih karena kemudahan dalam proses pengujian. *Filter paper* yang digunakan adalah *filter paper Whatman no. 42*. Pengujian dengan menggunakan metode *filter paper* mengacu pada ASTM D 5298 (ASTM, 2003).

Pada metode *filter paper*, nilai *suction* dari benda uji ditentukan dari kurva kalibrasi hubungan antara kadar air *filter paper* (*filter paper water content*) dengan nilai *suction* yang tergantung dari jenis *filter paper* yang digunakan (ASTM, 2003). Terdapat beberapa kurva kalibrasi kadar air *filter paper* (*filter paper water content*)-*suction*, diantaranya kurva kalibrasi pada ASTM D5298 (Gambar 2. 16), Leong dkk. (2016) pada Gambar 2. 17, dan Kim dkk. (2016) pada Gambar 2. 18. Pada penelitian ini, kurva kalibrasi yang digunakan adalah kurva kalibrasi yang terdapat dalam ASTM D 5298. Untuk menghitung nilai *suction*, persamaan yang digunakan yaitu persamaan yang terdapat dalam Gambar 2. 16

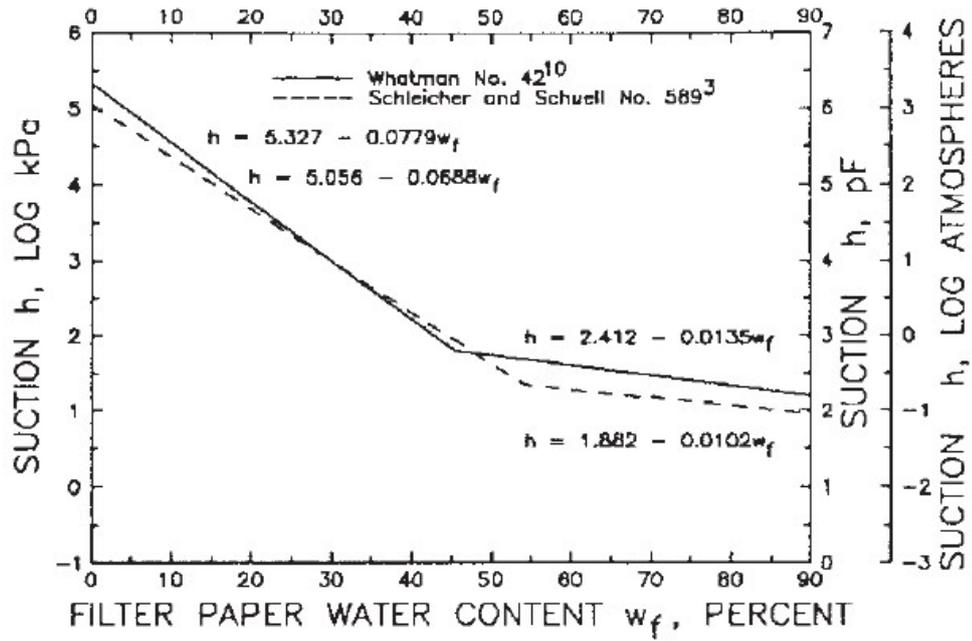
$$h = 5,327 - 0,077w_f, \text{ untuk } w_f < 45,3\% \quad (2. 22)$$

$$h = 2,412 - 0,0135w_f, \text{ untuk } w_f \geq 45,3\% \quad (2. 23)$$

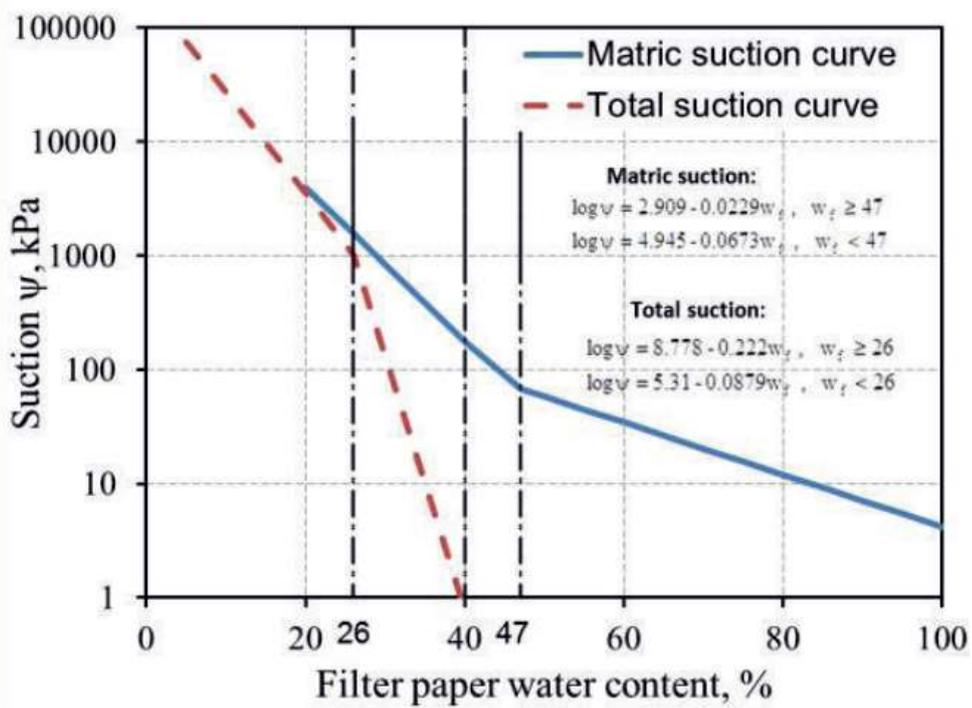
dengan:

$h$  = *suction* (Log kPa)

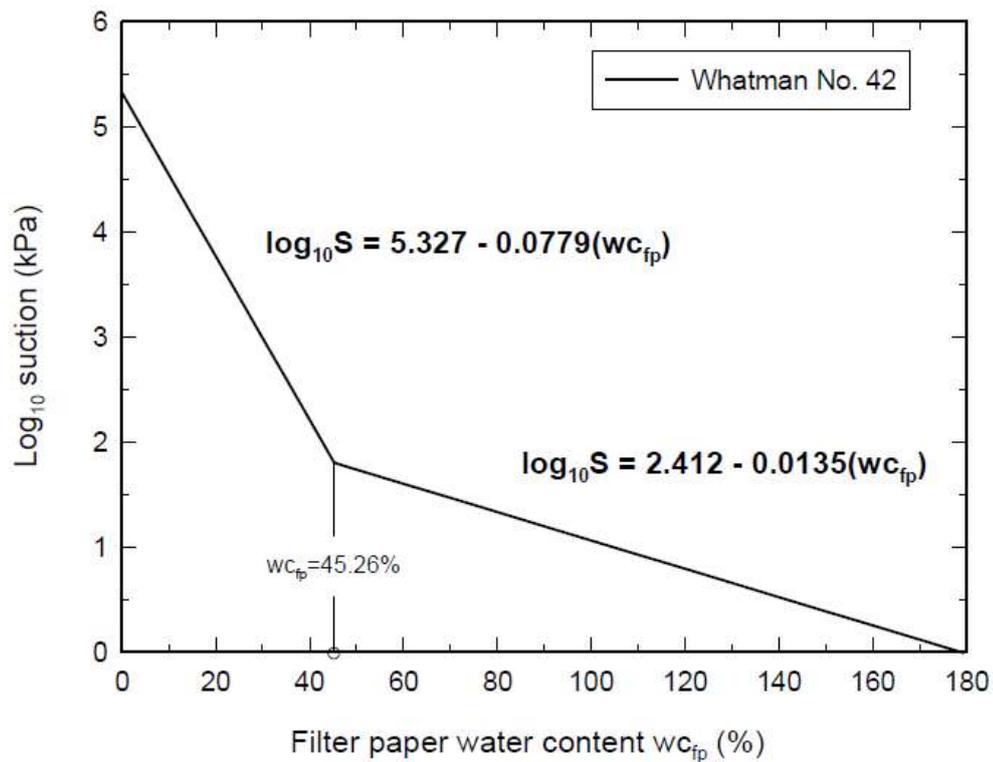
$w_f$  = kadar air *filter paper* (%)



Gambar 2. 16 Kurva kalibrasi kadar air *filter paper-suction* (ASTM, 2003).



Gambar 2. 17 Kurva kalibrasi kadar air *filter paper -suction* (Leong dkk., 2016).



Gambar 2. 18 Kurva kalibrasi kadar air *filter paper* -suction (Kim dkk., 2016).

### 2.2.3. Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

*Soil Water Characteristic Curve* (SWCC) digunakan untuk menggambarkan hubungan antara *matric suction* dengan kadar air tanah (baik berupa kadar air gravimetric ( $w$ ), kadar air volumetric ( $\theta_w$ ) atau derajat kejenuhan ( $S$ ) pada tanah tak jenuh (Fredlund dan Xing, 1994; Kim dkk., 2016). SWCC sangat penting untuk menganalisis perilaku tanah tak jenuh air dalam berbagai bidang (Rajesh dkk., 2017). SWCC juga sangat berpengaruh dalam memprediksi sifat mekanis, parameter permeabilitas dan kuat geser tanah tak jenuh air (Shen dkk., 2013).

Terdapat banyak persamaan yang dapat digunakan untuk *fitting* SWCC, salah satunya adalah persamaan yang diajukan oleh van-Genuchten (1978), seperti yang terdapat dalam Persamaan 2. 24.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad (2. 24)$$

dan,

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2.25)$$

maka,

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)}} \quad (2.26)$$

dengan:

$\theta$  = kadar air volumetrik,

$\theta_s$  = kadar air jenuh,

$\theta_r$  = kadar air residu,

$\alpha$  = invers dari nilai tekanan udara (*air entry value*),

$h$  = *head suction*,

$n$  = indeks distribusi ukura pori tanah.

#### 2.2.4. Permeabilitas Tanah

Permeabilitas adalah kemampuan suatu bahan berpori untuk meloloskan atau merembeskan air atau bahan cair lainnya melalui pori-pori dari bahan tersebut. Pada tanah, permeabilitas adalah sifat tanah yang mampu mengalirkan air pada rongga atau pori tanah. Tanah dapat bersifat lolos air disebabkan oleh adanya rongga-rongga (pori) yang saling berhubungan dimana air mengalir dari titik dengan energi yang tinggi ke titik dengan energi yang lebih rendah. Dalam praktik, istilah *permeable* (mudah meloloskan air) digunakan untuk tanah yang memiliki sifat untuk meloloskan air seperti kerikil. Sebaliknya, istilah *impermeable* (kedap air) digunakan untuk tanah yang sulit atau kemampuan yang kecil untuk meloloskan air seperti tanah lempung (Hardiyatmo, 2012; Muntohar, 2009)

Nilai permeabilitas suatu tanah dinyatakan dalam koefisien permeabilitas ( $k$ ) yang secara umum dinyatakan dalam cm/s atau m/s dalam satuan SI. Untuk mendapatkan nilai koefisien permeabilitas ( $k$ ) suatu tanah, terdapat dua jenis pengujian yang dapat dilakukan di laboratorium yaitu metode tinggi energi tetap (*constant head method*) dan metode tinggi energi berubah (*falling head method*). Pada penelitian ini, pengujian permeabilitas tanah menggunakan metode tinggi energi tetap (*constant head method*). Pengujian ini menggunakan ASTM D 5084

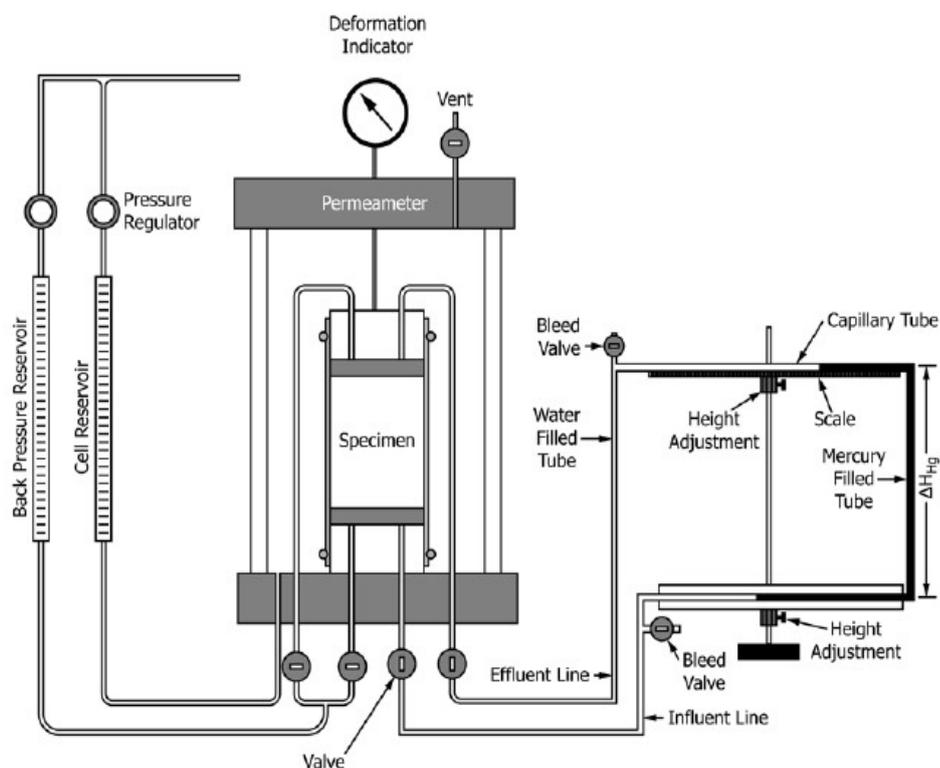
(ASTM, 2010) sebagai standar uji acuan. Gambar 2. 19 menunjukkan skema alat permeabilitas dengan menggunakan metode energi tetap (*constant head method*).

Prinsip pengujian dengan metode *constant head* yaitu menghitung jumlah air yang mengalir dalam benda uji dengan perbedaan tinggi tekanan pada saluran masuk air (*inlet*) dan tinggi tekanan pada saluran keluar air (*outlet*) adalah tetap selama proses pengujian berlangsung. Nilai koefisien permeabilitas pada pengujian dengan metode ini dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2. 27.

$$k = \frac{\Delta Q \cdot L}{A \cdot \Delta h \cdot \Delta t} \quad (2. 27)$$

dengan:

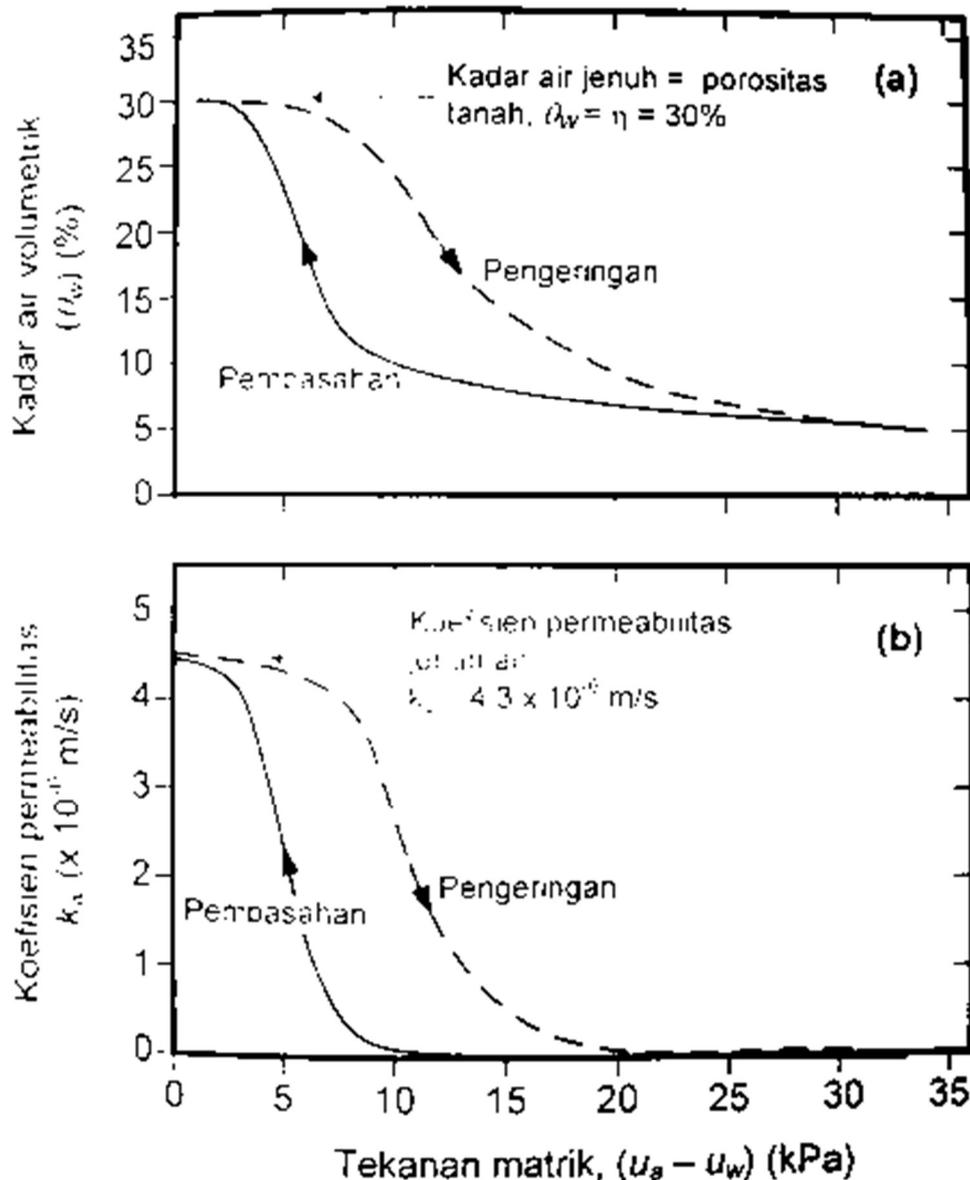
- $k$  = koefisien permeabilitas tanah (m/s),
- $\Delta Q$  = jumlah air yang merembes dalam waktu  $\Delta t$  (m<sup>3</sup>),
- $L$  = tinggi benda uji (m),
- $A$  = luas penampang benda uji (m<sup>2</sup>),
- $\Delta t$  = perbedaan waktu pembacaan (s),
- $\Delta h$  = perbedaan tinggi tekanan pada *outlet* dan *inlet* (m).



Gambar 2. 19 Skema alat uji permeabilitas.

a. Permeabilitas Tanah Tidak Jenuh Air

Secara umum, nilai koefisien permeabilitas pada tanah tidak jenuh air (*unsaturated hydraulic conductivity*) lebih rendah dibandingkan pada tanah jenuh air dan sangat bergantung pada tekanan *suction* serta derajat kejenuhan (Muntohar, 2009). Koefisien permeabilitas tanah pada tanah tidak jenuh air dapat diperoleh dari SWCC. Menurut Muntohar (2010), bentuk umum dari hubungan koefisien permeabilitas pada tanah tidak jenuh air ditampilkan pada Gambar 2. 20.



Gambar 2. 20 Kurva karakteristik kadar air dan permeabilitas untuk tanah berpasir (Muntohar, 2010)

### 2.2.5. Pengukuran Intensitas Hujan

Banyak faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng salah satunya merupakan hujan. Hujan yang terjadi di lereng dapat menyebabkan aliran air hujan yang bisa berupa aliran permukaan (*surface run-off*) yang dapat menyebabkan longsor berupa lumpur (*mud flow*) atau berupa infiltrasi. Infiltrasi air hujan akan menyebabkan tanah yang semula tidak jenuh air menjadi jenuh air sehingga meningkatkan tekanan air pori di dalam lereng dan memicu terjadi ketidakstabilan lereng (Muntohar dkk., 2013). Karena itulah pengukuran intensitas hujan menjadi sangat penting guna untuk menganalisis kestabilan suatu lereng.

Hampir disetiap negara, *rain gauges* menjadi sumber data utama dalam pengukuran hujan, akan tetapi data yang didapatkan dari pengukuran dengan *rain gauge* sangat terbatas karena cakupan wilayah pengukuran yang terbatas (Ouma dkk., 2012). Di Indonesia sendiri, untuk mendapatkan data pengamatan curah hujan yang representatif (baik kualitas maupun kuantitas/ panjang data pengamatan) di suatu tempat sangat sulit. Hal ini dikarenakan keterbatasan alat ukur terutama di daerah yang terpencil (Syaifullah, 2014).

Perkembangan teknologi terkini berupa teknologi satelit (*remote sensing*) memberikan terobosan dalam pengukuran intensitas hujan (*presipitasi*) karena dengan teknologi *remote sensing* ini mampu melakukan pengukuran presipitasi dari jarak jauh (*remote*) (Syaifullah, 2014). Salah satu teknologi satelit yang sudah dikembangkan adalah TRMM (*Tropical Rainfal Measuring Mission*) yang dikembangkan oleh NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) dan JAXA (*Japan Aeraspace Exploration Agency*), yang menghasilkan data presipitasi (curah hujan) yang didapat dari satelit meteorology TRMM. TRMM sendiri sudah menjadi sumber data selama lebih dari 20 tahun untuk meteorologi, hidrologi dan untuk penggunaan lainnya diseluruh dunia (Liu dkk., 2012).

Syaifullah (2014) melakukan validasi data curah hujan TRMM dengan data hujan yang berasal dari tiga DAS di wilayah Indonesia (DAS Citarum-Jawa Barat, DAS Sutami-Brantas Jawa Timur dan DAS Larona Sulawesi Selatan), hasil analisis menunjukkan intensitas hujan dari satelit TRMM mempunyai pola yang mirip dengan curah hujan dari hasil pengukuran (aktual) dengan nilai yang berada dibawah perkiraan. Ouma dkk. (2012) menggunakan data hujan TRMM untuk

mengestimasi data curah hujan dari hasil pengukuran 12 *rain gauge* yang berlokasi di cekungan sungai Nzoia, Afrika Timur. Hasil menunjukkan hasil sudah cukup baik dengan varian kurang dari 5%.

#### 2.2.6. Pemodelan *Coupled Analysis* dengan SIGMA/W

SIGMA/W adalah sebuah *software* berbasis elemen hingga (*finite element*) yang dapat digunakan untuk menganalisis tegangan (*stress*) dan deformasi (*deformation*) dari struktur tanah (Geo-Slope, 2010). SIGMA/W dapat juga dikombinasikan dengan *software* lain seperti SEEP/W, VADOSE/W atau QUAKE/W.

SIGMA/W dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah deformasi dengan menggunakan analisis *coupled* atau *uncoupled*. Dengan analisis *coupled*, persamaan *stress-deformation* dan *seepage* diselesaikan secara berurutan. Dengan menggunakan analisis *coupled* pada Geo-Studio, maka seluruh parameter (baik parameter geser atau hidrolik) dan kondisi batas dapat diterapkan pada SIGMA/W. Pada analisis *coupled*, terdapat tiga persamaan yang terdapat dalam setiap *node* pada setiap elemen. Dua diantaranya adalah persamaan *equilibrium (displacement)* dan satu persamaan *continuity* (aliran). Penyelesaian tiga persamaan tersebut secara berurutan dapat memberikan perubahan pada nilai *displacement* dan tekanan air pori.

##### a. Persamaan konstitutif untuk struktur tanah

Hubungan perubahan tegangan-regangan pada tanah tak jenuh air dapat dituliskan berdasarkan Persamaan 2. 28 berikut.

$$\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x \\ \Delta \varepsilon_y \\ \Delta \varepsilon_z \\ \Delta \gamma_{xy} \\ \Delta \gamma_{yz} \\ \Delta \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta(\sigma_x - u_a) \\ \Delta(\sigma_y - u_a) \\ \Delta(\sigma_z - u_a) \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{yz} \\ \Delta \tau_{zx} \end{Bmatrix} \\
+ \frac{1}{H} \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & 0 & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta(u_a - u_w) \\ \Delta(u_a - u_w) \end{Bmatrix} \quad (2.28)$$

dengan:

- $\varepsilon$  = regangan normal
- $\gamma$  = *engineering* regangan geser
- $\tau$  = tegangan geser
- $u_a$  = tekanan udara pori
- $u_w$  = tekanan air pori
- E = modulus elastis tanah
- H = modulus tanah tak jenuh dengan berdasarkan dari *matric suction*,
- $\nu$  = *poisson's ratio*.

Hubungan ini dapat ditulis ulang dalam bentuk tegangan regangan untuk analisis dua dimensi yang ditunjukkan pada Persamaan 2. 29.

$$\begin{Bmatrix} \Delta(\sigma_x - u_a) \\ \Delta(\sigma_y - u_a) \\ \Delta(\sigma_z - u_a) \\ \Delta \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \left( \varepsilon_x - \frac{u_a - u_w}{H} \right) \\ \Delta \left( \varepsilon_y - \frac{u_a - u_w}{H} \right) \\ \Delta \left( \varepsilon_z - \frac{u_a - u_w}{H} \right) \\ \Delta \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

Perubahan pada hubungan tegangan-regangan juga dapat dituliskan seperti pada Persamaan 2. 30 berikut;

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} - [D]\{m_h\}(u_a - u_w) + \{\Delta u_a\} \quad (2. 30)$$

dengan:

$$[D] \quad = \text{drained constitutive matrix,}$$

$$\{m_h\}^T \quad = \left\langle \frac{1}{H} \frac{1}{H} \frac{1}{H} 0 \right\rangle .$$

Untuk tanah jenuh, persamaan untuk tegangan total ditunjukkan pada Persamaan 2. 31.

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} - \{m\}\Delta u_w \quad (2. 31)$$

dengan:

$$\{m\} \quad = \text{unit isotropic tensor, } \langle 1 \ 1 \ 1 \ 0 \rangle .$$

b. Persamaan aliran

Aliran air pori dua dimensi yang terjadi pada tanah didasarkan pada hukum Darcy dan dinyatakan sebagai tekanan air pori seperti yang dijelaskan pada Persamaan 2. 32.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \left( \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u_w}{\partial y} + 1 \right) \right) + Q = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (2. 32)$$

dengan:

$$k_x, k_y \quad = \text{hydraulic conductivity dalam arah x dan y,}$$

$$u_w \quad = \text{tekanan air pori,}$$

$$\gamma_w \quad = \text{berat volume air,}$$

$$Q \quad = \text{sumber atau batasan aliran yang diterapkan,}$$

$$\theta_w \quad = \text{kadar air volumetric, dan}$$

$$t \quad = \text{waktu.}$$

Kadar air volumetrik didapatkan dari Persamaan 2. 33 berikut.

$$\theta_w = \frac{\beta}{3} \varepsilon_v - \alpha u_w \quad (2. 33)$$

dan:

$$\beta = \frac{E}{H} \frac{1}{(1-2\nu)} = \frac{3K_B}{H} \quad (2.34)$$

$$\omega = \frac{1}{R} - \frac{3\beta}{H} \quad (2.35)$$

dengan:

$K_B$  = modulus bulk,

$R$  = sebuah modulus yang berhubungan dengan perubahan pada kadar air volumetrik dan *matric suction*

Karena *soil-water characteristic curve* adalah sebuah grafik yang menunjukkan perubahan dari kadar air volumetrik yang mempengaruhi perubahan pada *matric suction*, maka parameter  $R$  dapat didapatkan dengan meng-invers kan nilai slope dari *soil-water characteristic curve*.

c. Persamaan elemen hingga untuk analisis *coupled*

Secara singkat, persamaan elemen hingga yang digunakan pada analisis *coupled* dituliskan pada persamaan berikut:

$$[K]\{\Delta\delta\} + [L_d]\{\Delta u_w\} = \{\Delta F\} \quad (2.36)$$

dan,

$$\beta [L_f]\{\Delta\delta\} - \left( \frac{\Delta t}{\gamma_w} [K_f] + \omega [M_N] \right) \{\Delta u_w\} = \Delta t \left( \{Q\}|_{t+\Delta t} + [K_f]\{y\} + \frac{1}{\gamma_w} [K_f]\{u_w\}|_t \right) \quad (2.37)$$

dengan:

$$[K] = \sum [B]^T [D] [B] \quad (2.38)$$

$$[L_d] = \sum [B]^T [D] \{m_H\} \langle N \rangle \quad (2.39)$$

$$\{m_H\} = \left\langle \frac{1}{H} \frac{1}{H} \frac{1}{H} 0 \right\rangle \quad (2.40)$$

$$[K_f] = \sum [B]^T [K_w] [B] \quad (2.41)$$

$$[M_N] = \sum \langle N \rangle^T \langle N \rangle \quad (2.42)$$

$$[L_f] = \sum \langle N \rangle^T \{m\} [B] \quad (2.43)$$

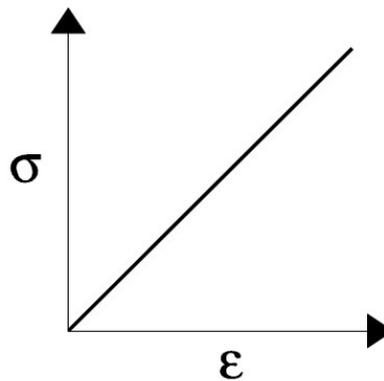
$$\beta = \frac{E}{H} \frac{1}{(1-2\nu)} = \frac{3K_B}{H} \quad (2.44)$$

$$\omega = \frac{1}{R} - \frac{3\beta}{H} \quad (2.45)$$

d. Model material

1. Model Linear-Elastik (*Elastic Linear Model*)

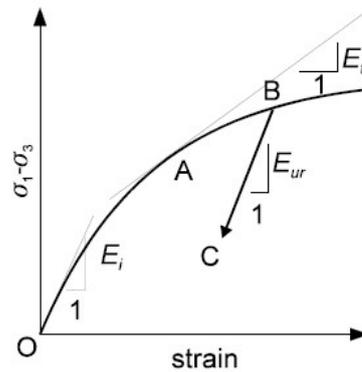
Model material yang paling sederhana pada SIGMA/W adalah model linear-elastic. Pada model ini, nilai tegangan berbanding lurus dengan regangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 21



Gambar 2. 21 Hubungan tegangan-regangan pada model linear-elastik.

2. Model Non Linear/ Hiperbolik (*Hyperbolic E-B Model*)

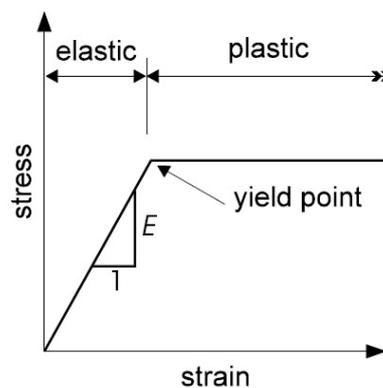
Menurut Geo-studio (2010) model *hypervolic E-B Model* adalah sebuah model yang diusulkan oleh Duncan dkk. (1980). Pada model ini, nilai *bulk modulus* (B) dianggap konstan selama pembebanan sedangkan nilai modulus elastisitas (E) bervariasi sesuai dengan hubungan hiperbolik. Hubungan tegangan-regangan dikendalikan oleh nilai modulus elastisitas awal dan poisson's ratio seperti pada Gambar 2. 22.



Gambar 2. 22 Hubungan tegangan-regangan pada model non linear/ hiperbolik.

### 3. Model Elastik Plastik (*Elastic Plastic Model*)

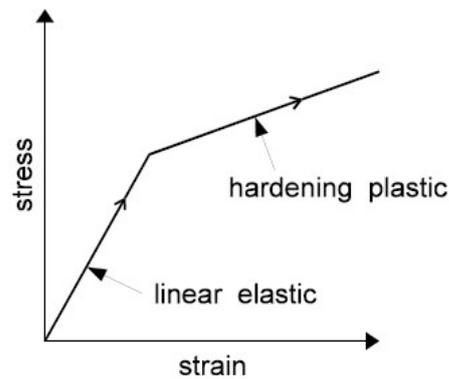
Model elastik-plastik di SIGMA/W menggambarkan hubungan *elastic* dan *perfectly-plastic*. Kurva hubungan tegangan-regangan untuk model ini dapat dilihat pada Gambar 2. 23. Diawal model, nilai tegangan berbanding lurus dengan regangan dan setelah mencapai nilai titik leleh, kurva tegangan-regangan menjadi horizontal.



Gambar 2. 23 Hubungan tegangan-regangan pada model elastik plastik.

### 4. Model Cam Clay

Model cam-clay adalah model pada keadaan kritis sama halnya dengan *hardening elastic plastic model*. Cam-clay model menggunakan parameter tegangan efektif. Hubungan tegangan-regangan pada model ini ditunjukkan pada Gambar 2. 24.



Gambar 2. 24 Hubungan tegangan-regangan pada model cam clay.

e. Kondisi batas (*Boundary Condition*) pada SIGMA/W

Terdapat banyak cara untuk menerapkan *force* dan *displacement* pada tanah dan struktur untuk memodelkan keadaan pada lapangan. Sebelum gaya-gaya diterapkan pada model, penting untuk terlebih dahulu untuk mengetahui apa yang akan dianalisis dengan data-data yang sudah dimasukkan.

1. *Force* atau *displacement*

Pada dasarnya terdapat dua tipe kondisi batas yang dapat diterapkan pada model tegangan-deformasi (*strees-deformation model*) yaitu *force* atau *displacement*. Pada *strees-deformation model* harus terdapat beberapa bagian dari yang diberi kondisi batas sebagai *zero displacement* agar terdapat reaksi dari beban yang diterapkan pada model (Geo-Slope, 2010).

2. *Body loads*

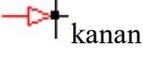
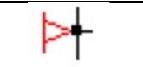
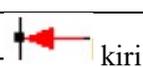
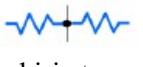
Berat sendiri (*body loads*) dimasukkan dalam analisis dengan menentukan berat volume tanah pada material. Untuk menerapkan beban ini pada setiap elemen, SIGMA/W akan melakukan perhitungan volume pada setiap elemen dan kemudian dikalikan dengan berat volume tanah yang selanjutnya diterapkan sebagai gaya pada setiap elemen. *Body loads* memainkan peran penting pada analisis *initial in-situ* pada SIGMA/W.

3. *Boundary condition location*

Pada SIGMA/W terdapat dua opsi dalam pemberian *boundary condition*, yaitu pada *nodal* atau *edge*. Pada SIGMA/W *boundary condition* dapat diberikan ke titik yang lebih spesifik dengan menggunakan *nodal boundary condition*. Tabel 2. 1 menunjukkan simbol pada berbagai tipe *boundary condition*. Selain pada

*nodal, boundary condition* juga bisa diberikan pada tepi (*edge*). Tabel 2. 2 menunjukkan simbol yang digunakan untuk *edge boundary condition*.

Tabel 2. 1 Simbol yang Digunakan Untuk Kondisi Batas (*Boundary Condition*)  
(Geo-Slope, 2010)

Type	Nilai	Simbol Arah X	Simbol Arah Y	Keterangan
Tidak ada	-	-	-	-
Perpindahan	positif (+)	 kanan	 atas	panah berlubang
Perpindahan	negatif (-)	 kiri	 bawah	panah berlubang
Perpindahan	nol (0)	 kanan	 atas	segitiga berlubang
Gaya	positif (+)	 kanan	 atas	panah padat
Gaya	negatif (-)	 kiri	 bawah	panah padat
Gaya	nol (0)			-
Spring	tidak dapat diterapkan	 kiri atau kanan	 naik atau turun	springs
Spring	nol (0)	-	-	-
Ritasi	nol (0)		-	lingkaran berlubang

f. Tipe analisis pada SIGMA/W

1. *Initial in-situ stresses*

SIGMA/W memiliki analisis khusus yang disebut analisis *insitu* yang dikhususkan untuk menganalisis tegangan-tegangan awal (*initial stress*). Sebagian besar analisis membutuhkan *initial stress* sebelum dilanjutkan ke tahap analisis selanjutnya seperti analisis pembebanan-deformasi (*load-deformation*) atau kopel Tegangan regangan (*coupled stress-strain*) dan analisis rembesan (*seepage analysis*). Tegangan (*stresses*) yang dihasilkan dari analisis *initial stress* hanya berasal dari gaya gravitasi dan kesetimbangan dari tanah tak terusik (*undisturbed soil*).

Tabel 2. 2 Simbol yang Digunakan Untuk Kondisi Batas Tepi (*Edge Boundary Condition*) (Geo-Slope, 2010)

Type	Nilai	Simbol	Keterangan
Tidak ada	-	-	-
Tegangan normal	positif (+)		garis di sepanjang <i>edge</i> , panah tegak lurus mendekati <i>edge</i>
Tegangan normal	negatif (-)		garis di sepanjang <i>edge</i> , panah tegak lurus menjauhi <i>edge</i>
Tegangan tangensial	positif (+)		garis di sepanjang <i>edge</i> , panah berlawanan dengan arah jarum jam di sekitar elemen
Tegangan tangensial	negatif (-)		garis di sepanjang <i>edge</i> , panah searah dengan arah jarum jam di sekitar elemen
Tegangan-X	positif (+)		garis di sepanjang <i>edge</i> , panah menunjukk kearah kanan
Tegangan-X	negatif (-)		garis di sepanjang <i>edge</i> , panah menunjukk kearah kiri
Tegangan-X	nol (0)		garis di sepanjang <i>edge</i>
Tegangan-Y	positif (+)		garis di sepanjang <i>edge</i> , panah mengarah ke atas
Tegangan-Y	negatif (-)		garis di sepanjang <i>edge</i> , panah mengarah ke bawah
Tegangan-Y	nol (0)		garis di sepanjang <i>edge</i>
Fluid Elevation	greater than min edge y-coordinate		garis di sepanjang <i>edge</i> , panah tegak lurus kearah <i>edge</i>
Fluid Elevation	less than min edge y-coordinate		panah sepanjang <i>edge</i>

## 2. *Load/deformation analysis*

Analisis Load/Deformasi (*load/deformation analysis*) adalah tipe analisis yang digunakan jika pengguna ingin menganalisis efek perubahan tegangan dan deformasi yang terjadi akibat penerapan beban.

### 3. *Dynamic deformation analysis*

Analisis deformasi dinamik (*dynamic deformation analysis*) adalah analisis yang digunakan untuk mengetahui deformasi yang diakibatkan oleh beban dinamik (gempa). Pada analisis ini, beban dinamik dianalisis terlebih dahulu dengan QUAKE/W dan kemudian dihubungkan dengan SIGMA/W untuk menganalisis deformasi yang terjadi

### 4. *Coupled Analysis*

Analisis dengan menggunakan *coupled analysis* pada SIGMA/W memungkinkan untuk menganalisis rembesan (*seepage*) dan tegangan-deformasi (*stress-deformation*) secara bersamaan. Dengan *coupled analysis* tidak perlu lagi untuk menganalisis *seepage* secara terpisah di SEEP/W. Semua *hydraulic properties* dan kondisi batas (*boundary condition*) dapat diaplikasikan pada SIGMA/W (Geo-Slope, 2010). Pada *coupled analysis* terdapat tiga persamaan yang terdiri dari 2 persamaan kesetimbangan (deformasi) dan satu persamaan kontinuitas (aliran). Menurut Qi dan Vanapalli (2015) analisis *coupled* memberikan hasil yang berbeda dengan analisis *uncoupled*. Hasil dari analisis rembesan dan deformasi saling mempengaruhi satu sama lain, sehingga perlu dianalisis secara bersamaan (*coupled analysis*) dari pada melakukan analisis secara terpisah dengan *uncoupled analysis*.

### 5. *Uncoupled Analysis*

Pada analisis *uncoupled analysis* penyelesaian persamaan rembesan dan deformasi diselesaikan secara terpisah. Rembesan (*seepage*) dianalisis terlebih dahulu dengan *software* SEEP/W. Hasil dari pemodelan yang dilakukan dengan SEEP/W kemudian digunakan pada SIGMA/W untuk mengetahui deformasi yang terjadi.