

## ABSTRAK

Kestabilan lereng dipengaruhi banyak faktor salah satunya adalah infiltrasi hujan. Hujan yang terinfiltrasi ke dalam lereng akan menambah berat tanah, dan tekanan air pori, serta mengurangi kuat geser tanah. Apabila air tersebut menembus lapisan yang menjadi bidang gelincir akan menyebabkan lapisan tersebut licin dan mengalami pergerakan. Salah satu pergerakan lereng yang terjadi adalah di Saluran Induk Kalibawang km 15+900 yang menyebabkan kerusakan pada Saluran Induk Kalibawang dan bangunan di sekitar lereng. Lereng dimodelkan dengan analisis *coupled stress-pore water pressure* menggunakan perangkat lunak SIGMA/W. Data yang dimasukkan dalam pemodelan ini berupa data topografi, parameter geser dan parameter hidraulik tanah. Data hujan yang digunakan berasal dari satelit TRMM yang dimulai pada tanggal 1 Juli-30 Agustus 2017. Terjadi penurunan tekanan air pori pada lereng selama periode pemodelan. Tekanan air pori pada kedalaman 14 m pada tanggal 1 Juli (awal pemodelan) sebesar 51,2 kPa dan pada 30 Agustus (akhir pemodelan) sebesar 10,5 kPa. Berdasarkan hasil pemodelan, deformasi yang terjadi pada lereng terus bertambah seiring bertambahnya waktu dengan perubahan yang semakin kecil. Deformasi yang terjadi pada BH-7 pada akhir pemodelan (30 Agustus 2017) sebesar 1,9 mm.

Kata kunci: pergerakan, analisis *coupled*, infiltrasi, tekanan air pori, deformasi,

## **ABSTRACT**

*Many factors affect the slope stability such as rainfall infiltration. The rainfall infiltration will increase the weight of soil, pore water pressure and reduce the shear strength. When the water flow through the slip surface, it will cause slope movement. This paper studies the slope movement in Kalibawang irrigation channel km. 15+900 which induces a failure of Kalibawang irrigation channel and other surrounding structures. The slope movement is modeled as coupled stress-pore water pressure analysis using SIGMA/W. Topography data, shear strength, and hydraulic parameter were applied as the input parameter. The rainfall data was collected from TRMM starting from 1 July to 30 August 2017. The pore water pressure on the slope was decreased. The pore water pressure in 14 m depth on 1 July (beginning of model) is 51.2 kPa and on 30 August (end of modeling) is 10.5 kPa. Based on the model, the deformation increased during modeling, but the deformation rate decreased over time. The deformation at the end of modeling (August, 30) is 1.9 mm at BH7.*

*Keyword: movement, coupled analysis, infiltration, pore water pressure, deformation*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kestabilan lereng dipengaruhi oleh banyak faktor seperti geologi, hidrologi, tofografi, iklim dan perubahan cuaca. Salah satu penyebab alami yang dapat mengganggu kestabilan lereng yaitu hujan, baik itu hujan lebat dengan durasi pendek atau hujan normal dengan durasi lama (Subiyanti dkk., 2015). Air hujan yang terinfiltrasi ke dalam tanah akan menambah massa tanah, sehingga apabila air tersebut menembus sampai lapisan yang berperan sebagai bidang gelincir dapat menyebabkan lapisan tersebut menjadi licin dan lapisan tanah di atasnya mengalami pergerakan mengikuti bidang gelincir lereng (Muntohar, 2009).

Salah satu lereng yang mengalami ketidakstabilan adalah lereng yang berada di Saluran Induk Kalibawang km. 15+900, Kabupaten Kulon Progo. Lereng ini mengalami pergerakan sehingga menyebabkan bangunan di atas lereng berupa sekolah dan rumah warga mengalami kerusakan. Selain di atas lereng kerusakan juga berada di bawah lereng yang menyebabkan Saluran Induk Kalibawang mengalami kerusakan parah.

Faktor aman (*safety factor*) adalah salah satu metode yang biasa digunakan untuk mengevaluasi stabilitas lereng. Sudah banyak penelitian yang mengkaji tentang perubahan nilai faktor aman akibat hujan diantaranya Rahardjo dkk. (2001), Lee dkk. (2009), Muntohar dkk. (2013), Gofar dan Lee (2008). Kajian tentang faktor aman di Saluran Induk Kalibawang sendiri sudah dilakukan, diantaranya oleh Subiyanti dkk. (2015), dan Muntohar dan Saputro (2014).

Selain faktor aman, deformasi juga dapat digunakan untuk menilai stabilitas lereng (Pramusandi dkk., 2015). Pemodelan tentang deformasi lereng yang diakibatkan oleh hujan dikaji oleh Haryanti dkk. (2010) dan (Pramusandi dkk., 2015). Akan tetapi pemodelan terhadap deformasi dan tekanan air pori dilakukan secara terpisah (*uncoupled*) dengan dua *software* yang berbeda. Pada penelitian ini tipe analisis yang digunakan adalah analisis kopel tegangan/ tekanan air pori (*coupled stress/PWP analysis*). Pada tipe analisis ini perubahan tekanan air pori

akan dianalisis secara bersamaan dengan perubahan tegangan yang menyebabkan deformasi pada lereng.

### **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas maka dapat dijabarkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh air hujan terhadap deformasi lereng pada daerah studi.
2. Bagaimana perubahan tekanan air pori tanah (*pore water pressure*) akibat pengaruh dari air hujan pada daerah studi.

### **1.3. Lingkup Penelitian**

Lingkup dari penelitian ini melingkupi hal-hal berikut ini:

1. Penelitian ini memodelkan lereng yang berada pada Saluran Induk Kalibawang km 15+900, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.
2. Penelitian ini menggunakan *software* SIGMA/W untuk memodelkan keadaan awal lereng (*insitu analysis*), dan analisis kopel antara tegangan-tekanan air pori (*stress-pore water pressure*).
3. Pengujian kuat geser tanah, SWCC dan permeabilitas tanah dilakukan dengan menggunakan sampel tanah asli (tidak terusik).
4. Data hujan yang digunakan pada penelitian ini berasal dari satelit TRMM Giovanni pada waktu kejadian 1 Juli 2017 - 30 Agustus 2017.
5. Data pengujian inklinometer di lapangan digunakan untuk validasi pergerakan lereng dari hasil pemodelan.

### **1.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan utama dari penelitian adalah untuk memodelkan pergerakan lereng akibat air hujan menggunakan SIGMA/W pada daerah studi. Secara khusus penelitian ini bertujuan sebagai berikut.

1. Untuk mengkaji deformasi lereng akibat infiltrasi air hujan.
2. Untuk mengkaji perubahan tekanan air pori akibat pengaruh dari air hujan.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini mengkaji perubahan deformasi lereng akibat infiltrasi air hujan. Hasil simulasi numerik dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan. Sehingga hasil penelitian dapat menambah pengetahuan mengenai mekanisme pergerakan lereng akibat infiltrasi air hujan di Saluran Induk Kalibawang km. 15+900. Dengan demikian, penelitian ini dapat dijadikan sebagai rujukan penelitian tentang pemodelan pergerakan lereng secara numerik.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

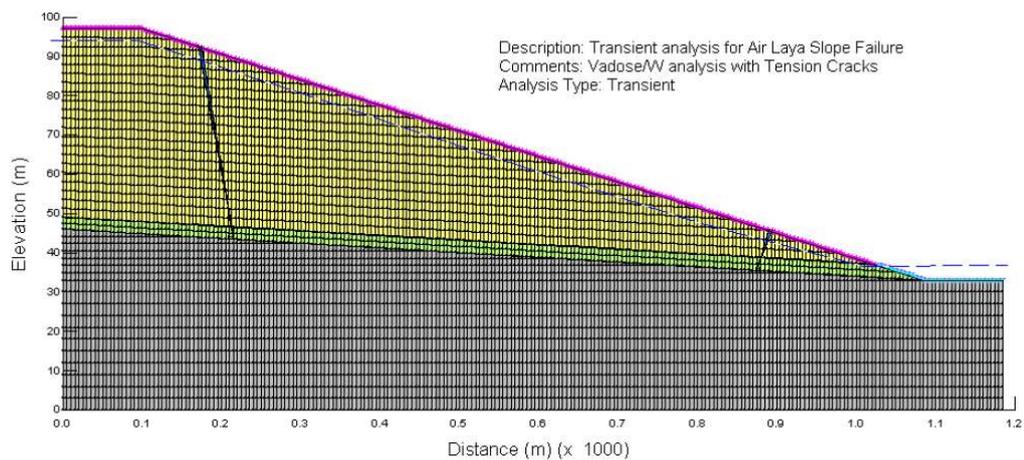
#### 2.1. Pemodelan Numerik Infiltrasi Hujan dan Stabilitas Lereng

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

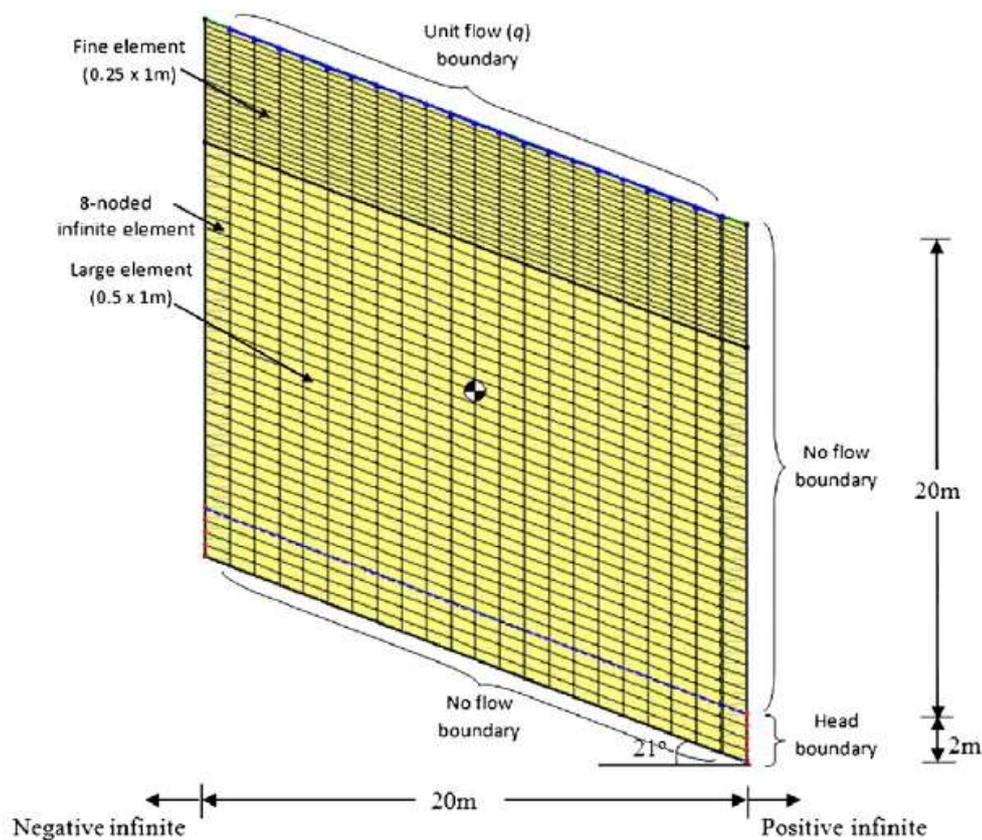
Desember 2001). Jumlah *mesh* pada pemodelan ini sebanyak 6887 elemen dengan tinggi 97 m dan panjang lereng 1185 m. Model yang digunakan pada pemodelan ini ditunjukkan oleh Gambar 2. 1. Nilai *suction* awal di permukaan lereng dibatasi dengan berdasarkan data tensiometer pada kedalaman 1,5 m yang kemudian 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 kedalam 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.



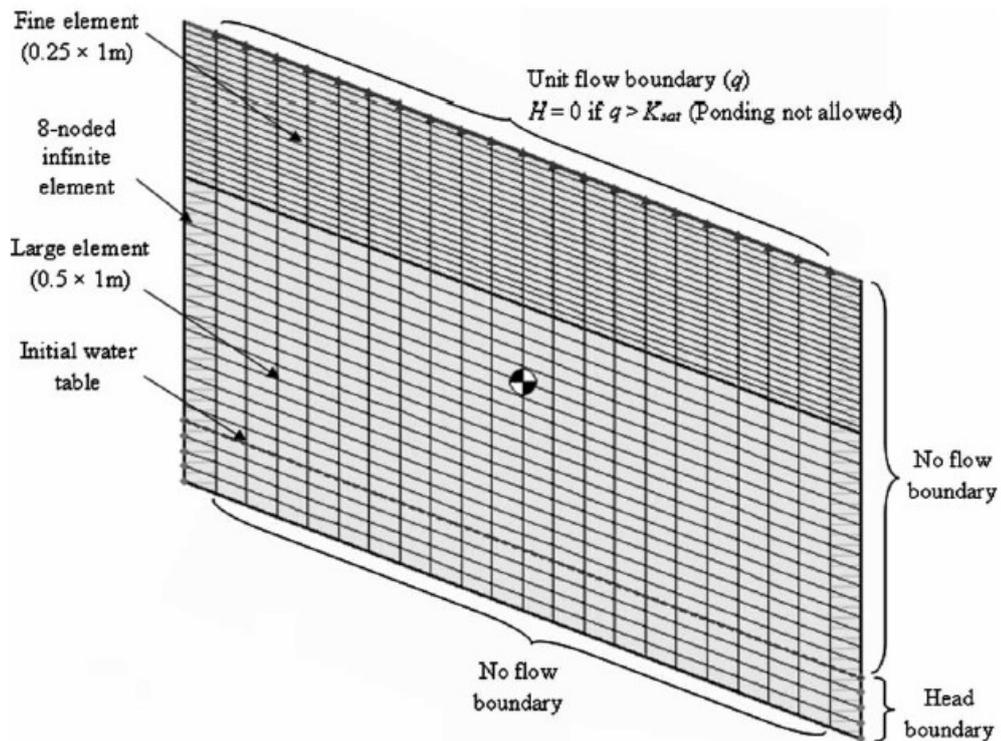
Gambar 2. 1 Model lereng pada VADOSE/W (Gofar dkk., 2006).

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.

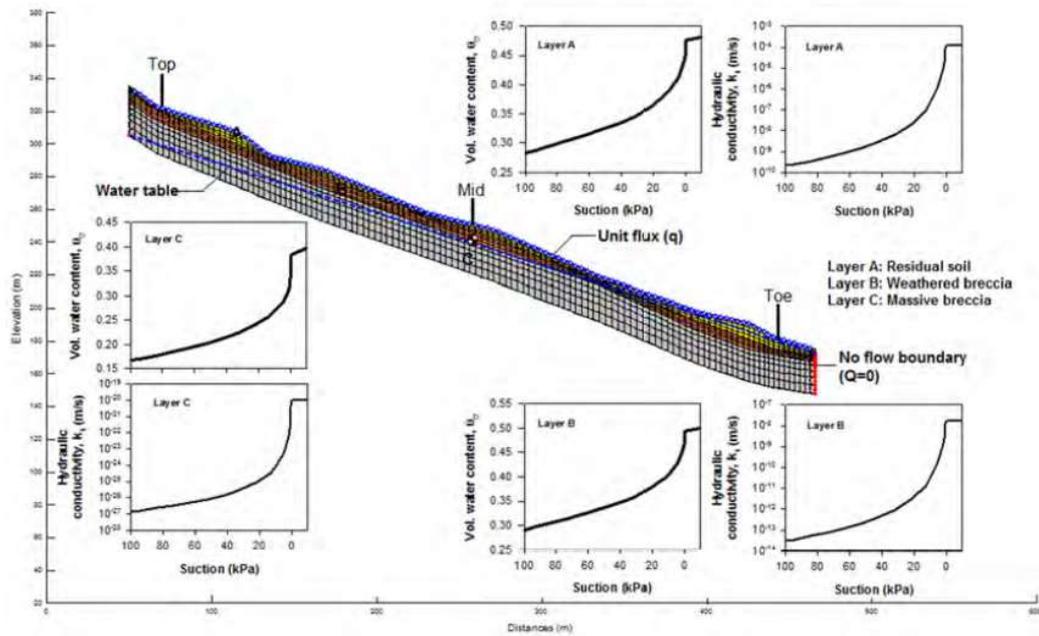


Gambar 2. 2 Model lereng tak hingga dan batas-batas yang diterapkan pada model (Lee dkk., 2009).



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

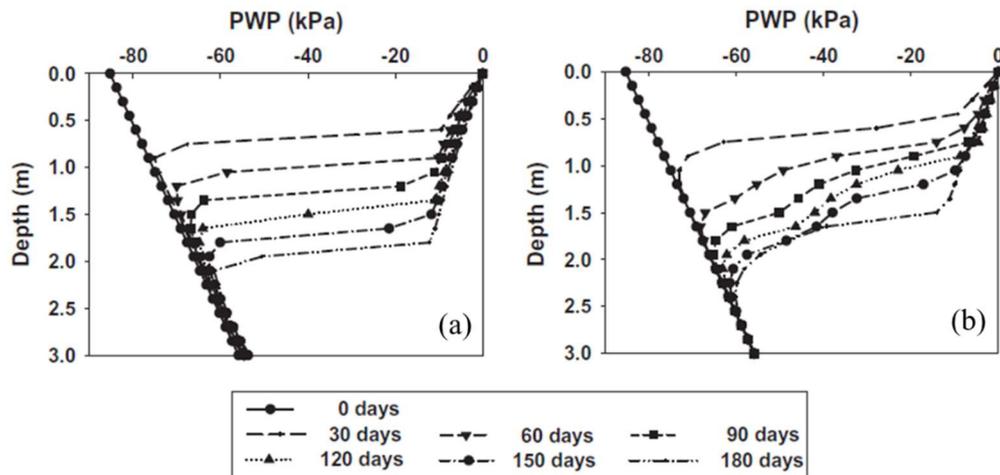
tanah dan menyebabkan naiknya tekanan air pori. Ketika tanah jenuh akibat infiltrasi, maka kekuatan geser tanah hilang, sehingga kemungkinan besar terjadi longsor.

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).

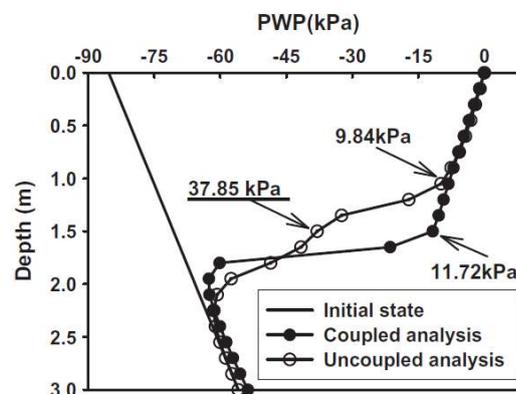
Qi dan Vanapalli (2015) mengkaji tentang hujan yang menyebabkan kegagalan pada lereng tanah ekspansif. Lereng dimodelkan dengan menggunakan SEEP/W dan SIGMA/W untuk menganalisis rembesan dan stabilitas lereng. Pemodelan lereng menggunakan dua tipe analisis yang berbeda yaitu *coupled analysis* dan *uncoupled 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).

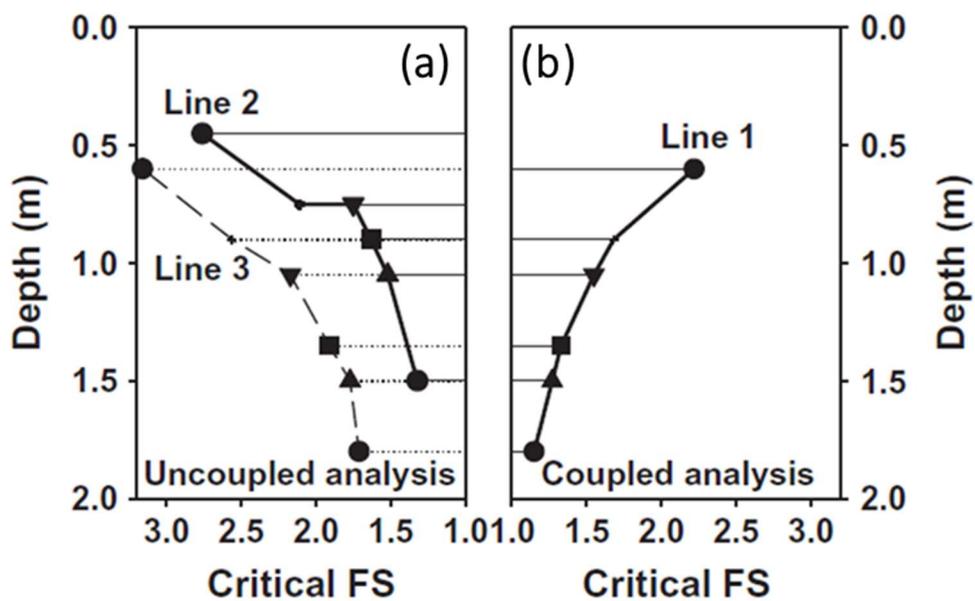
Perbedaan profil tekanan air pori disebabkan perbedaan dari sifat mekanik tanah dengan *suction*. Pada analisis *coupled* terjadi perubahan volume yang besar dan menyebabkan perubahan *suction* yang besar pula dibandingkan dengan *uncoupled analysis*. Sebagai hasilnya pembasahan pada *coupled analysis* 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.



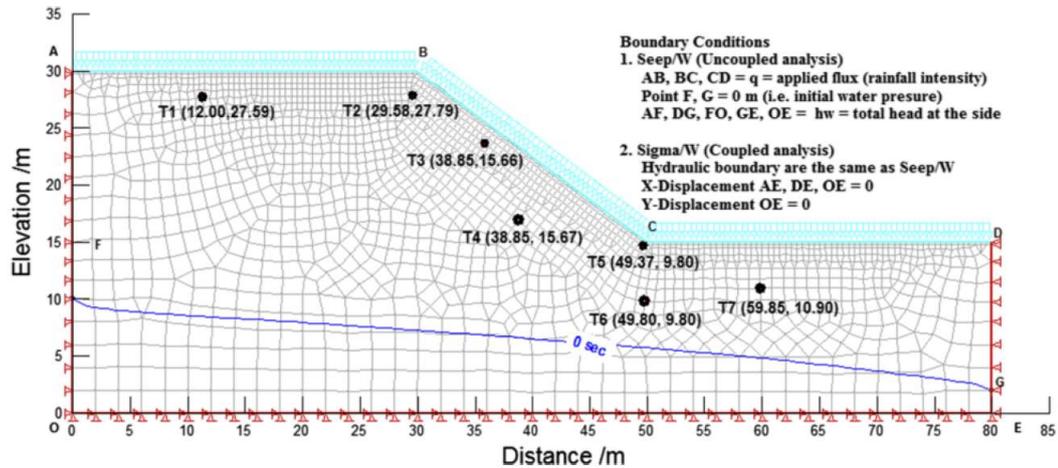
Gambar 2. 6 Perbandingan nilai *suction* pada analisis *coupled* dan *uncoupled* (Qi dan Vanapalli, 2015).

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.

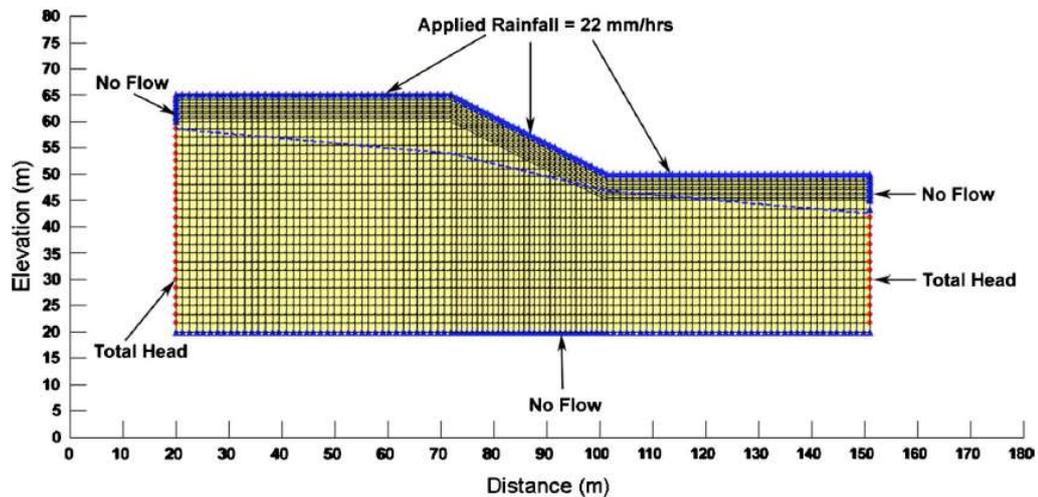


Gambar 2. 7 Perbandingan nilai FS pada (a) analisis *coupled*, (b) *uncoupled* (Qi dan Vanapalli, 2015).



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

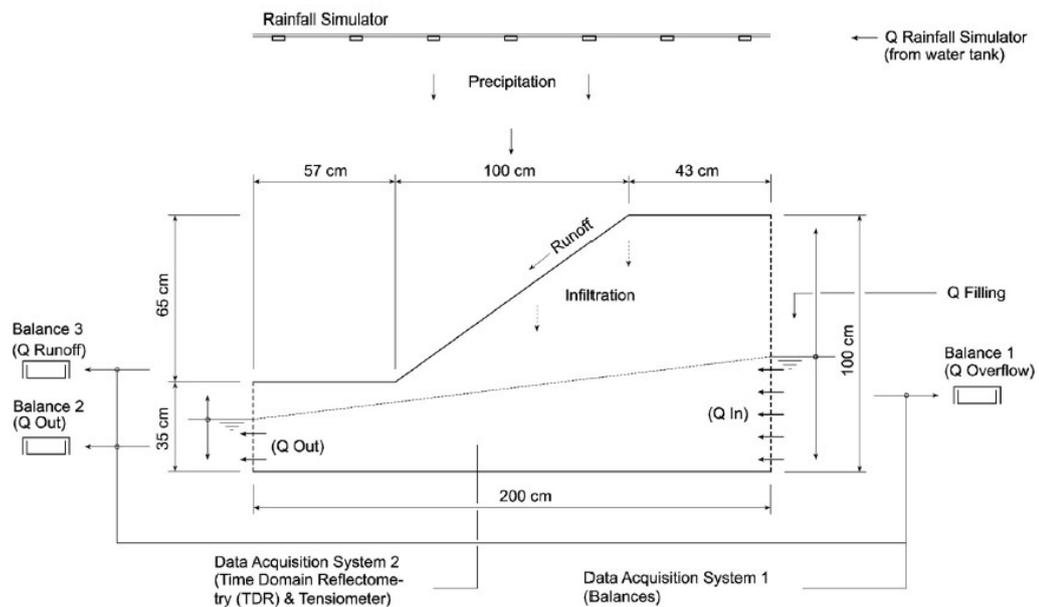
Rahardjo dkk. (2010) mengkaji pengaruh posisi muka air tanah terhadap stabilitas lereng selama hujan. Tiga posisi muka air tanah (dalam kondisi kering, setengah basah dan basah) dengan empat intensitas hujan yang berbeda dimodelkan dalam kajian ini. Model lereng dan kondisi batas yang diterapkan pada 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).

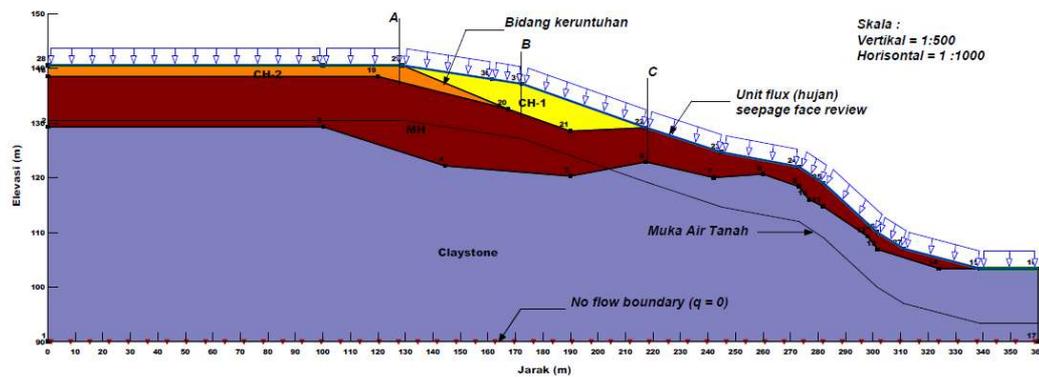
Schnellmann dkk. (2010) memodelkan lereng tak jenuh dalam pemodelan laboratorium dan mengkaji pengaruh peningkatan muka air tanah pada model tersebut. Dalam pemodelan ini, tanah ditempatkan kedalam sebuah kotak dengan

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:

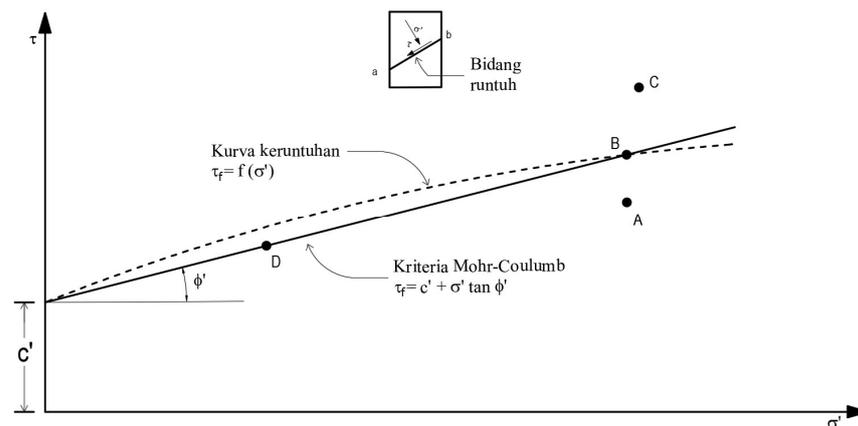
$\tau$  = kuat geser tanah,

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

$c'$  = kohesi tanah efektif,

$\phi'$  = sudut gesek tanah efektif.

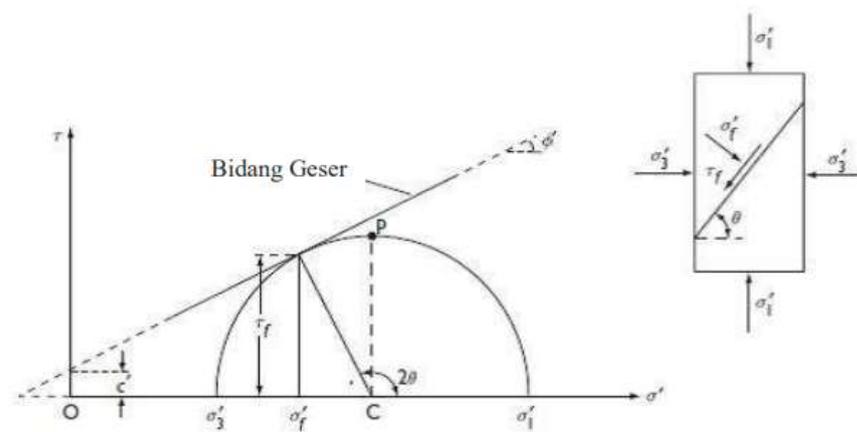
Dalam Muntohar (2009) teori keruntuhan Mohr-Coulumb tersebut dapat dijelaskan melalui Gambar 2. 12. Jika tegangan normal efektif dan tegangan geser tanah pada suatu bidang runtuh mencapai titik A maka keruntuhan geser belum terjadi walaupun kombinasi tegangan pada titik A lebih besar dari pada titik 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.