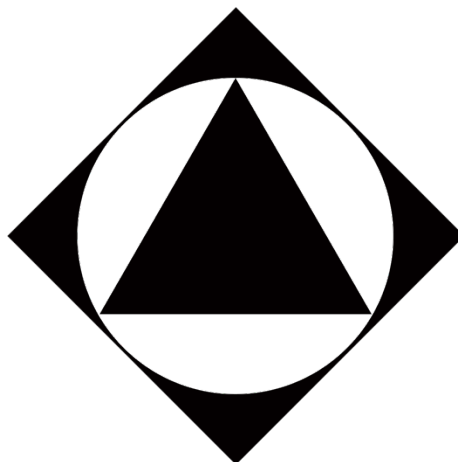


LAPORAN AKHIR PENELITIAN

ANALISIS STABILITAS PADA LERENG SUNGAI YANG DIPENGARUHI PASANG SURUT

**Indra Noer Hamdhan
Desti Santi Pratiwi**



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL - BANDUNG

2018

Analisis Stabilitas pada Lereng Sungai yang Dipengaruhi Pasang Surut

***Indra Noer Hamdhan¹, Desti Santi Pratiwi²**

¹Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional, Bandung, ²Program Studi Magister Teknik Sipil, Insitut Teknologi Bandung, Bandung
^{*)}indranh@itenas.ac.id

Received: 8 Januari 2018 Revised: 20 Juni 2018 Accepted: 25 Juni 2018

Abstract

The slopes on river banks close to the estuary can be affected by tides, so it can experience stability in the river bank. Therefore, this research is conducted to determine the stability of river bank due to tides with numerical analysis. The numerical analysis method was done by 2D Plaxis Software that using the Finite Element Method. The analysis was conducted on a homogeneous slope with 2 (two) different soil permeability coefficient values, there are low permeability and high permeability. The analysis is modeled by fully coupled analysis between deformation and ground water flow analysis. The results of the analysis indicate that a tidal are influence the stability of the slope based on the safety factor value. The highest of safety factor value are shown in high tide condition, and the lowest occur at low tide condition. This happens because the high tide condition occur the addition of hydraulic pressure from the water that will resist the sliding, while the low tide condition will reduce the hydraulic pressure. This can be a concern to the stability of river bank with tidal condition in order to avoid the erosion during the low tide conditions. The comparison of safety factors between two different types of soil permeability are not significant, the difference are only 3%.

Keywords: Tidal, slope stability, fully coupled analysis, coefficient of permeability, safety factor

Abstrak

Tebing pada tepi sungai yang berlokasi dekat dengan muara dapat terpengaruhi oleh pasang surut air laut, sehingga dapat mengalami gangguan kestabilan pada tebing sungai tersebut. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kestabilan lereng di tebing sungai akibat pengaruh pasang surut dengan pendekatan analisis numerik. Adapun analisis numerik yang dilakukan yaitu dengan menggunakan Program Plaxis 2D yang berbasis Metode Elemen Hingga. Analisis dilakukan terhadap lereng yang homogen dengan dua nilai koefisien permeabilitas tanah yang berbeda, yaitu permeabilitas rendah dan permeabilitas tinggi. Tahap analisis dilakukan dengan menggunakan analisis ganda antara analisis deformasi dengan analisis aliran air dalam tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa adanya pengaruh pasang surut pada kestabilan lereng yang ditunjukkan dengan nilai faktor keamanan. Nilai faktor keamanan terbesar terjadi ketika kondisi pasang, sedangkan faktor keamanan terkecil terjadi ketika kondisi surut. Hal tersebut terjadi karena ketika kondisi pasang terjadi penambahan tekanan hidrostatik dari air yang akan menahan kelongsoran, sedangkan pada kondisi surut terjadi pengurangan tekanan hidrostatik. Hal ini dapat menjadi perhatian untuk kestabilan lereng di lereng sungai yang terpengaruhi pasang surut agar tidak terjadi kelongsoran ketika kondisi surut. Adapun perbandingan nilai faktor keamanan untuk kedua jenis tanah dengan permeabilitas berbeda tidak terlalu signifikan, yaitu perbedaannya hanya sebesar 3%.

Kata kunci: Pasang surut, stabilitas lereng, analisis ganda, koefisien permeabilitas, faktor keamanan.

Pendahuluan

Lereng merupakan suatu permukaan tanah yang memiliki kemiringan dan membentuk sudut tertentu terhadap bidang horizontal dan tidak terlindungi (Das, 1985). Lereng biasanya terdapat di tepi jalan maupun di tebing sungai. Tebing yang berada di tepi sungai apabila lokasinya tidak jauh dari muara, maka akan dipengaruhi juga oleh pasang surut air laut, dan hal ini dapat menyebabkan terganggunya stabilitas lereng di tebing tersebut. Stabilitas lereng merupakan hal penting dalam ilmu geoteknik, karena apabila stabilitas lereng terganggu maka lereng rentan terhadap kelongsoran.

Pasang surut air laut merupakan suatu fenomena pergerakan naik turunnya permukaan air laut secara berkala yang diakibatkan oleh kombinasi gaya gravitasi dan gaya tarik menarik dari benda-benda astronomi terutama oleh matahari, bumi dan bulan (Donkers, 1964).

Pasang surut di Indonesia dibagi menjadi empat (Wyrtki, 1961): (1) Pasang surut harian tunggal (*diurnal*), merupakan pasang surut yang hanya terjadi satu kali pasang dan satu kali surut dalam satu hari. (2) Pasang surut harian ganda (*semi diurnal*), merupakan pasang surut yang terjadi dua kali pasang dan dua kali surut yang tingginya hampir sama dalam satu hari. (3) Pasang surut campuran condong harian tunggal (*prevailing diurnal*), merupakan pasang surut yang dalam sehari terjadi satu kali pasang dan satu kali surut tetapi terkadang dengan dua kali pasang dan dua kali surut yang sangat berbeda dalam, tinggi dan waktu. (4) Pasang surut campuran condong harian ganda (*prevailing semi diurnal*), merupakan pasang surut yang terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dalam sehari tetapi terkadang terjadi satu kali pasang dan satu kali surut dengan memiliki tinggi dan waktu yang berbeda.

Definisi sungai menurut Putra (2014) merupakan aliran terbuka dengan ukuran geometrik seperti tampak melintang dan memanjang serta kemiringan lembah yang berubah sepanjang waktu, tergantung debit, jumlah dan jenis sedimen yang terangkut oleh air, serta material dasar dan tebing. Jenis sungai dapat dibagi menjadi dua menurut pengaruh pasang surutnya, yaitu sungai non-pasang surut dan sungai pasang surut. Sungai non-pasang surut yaitu, sungai yang tinggi airnya tidak dipengaruhi oleh gaya pasang surut dan biasanya terletak di hulu sungai. Adapun ketinggian muka air pada sungai non-pasang surut yang dipengaruhi oleh besarnya debit air yang mengalir di sungai tersebut. Sedangkan sungai pasang surut, yaitu sungai yang tinggi airnya

dipengaruhi oleh gaya pasang surut dan biasanya terjadi di hilir sungai. Pada sungai pasang surut, air laut akan memasuki sungai pada saat pasang naik (*flood tide*) dan akan mengalir ke laut kembali pada saat surut (*ebb tide*).

Kestabilan lereng di tebing sungai yang dipengaruhi pasang surut perlu diperhatikan agar tidak mengalami erosi yang dapat mengakibatkan banyak kerugian, seperti kerusakan struktur bangunan hingga korban jiwa. Lokasi sungai yang terpengaruh pasang surut tidak hanya di dekat muara laut, akan tetapi jika kemiringan sungai landai, pasang surut pun akan mempengaruhi hingga ke daerah hulu contohnya seperti sungai-sungai besar di Kalimantan dan Sumatera. Oleh karena itu telah diteliti stabilitas lereng di tebing sungai yang dipengaruhi pasang surut dengan cara pendekatan numerik.

Pada umumnya dalam menganalisis stabilitas lereng di tebing sungai, analisis deformasi dan analisis aliran dalam tanah dilakukan secara terpisah. Sedangkan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan analisis ganda, dimana analisis deformasi dan analisis aliran dalam tanah akibat pasang surut diperhitungkan secara bersamaan.

Pemodelan pasang surut yang dilakukan berbeda dengan *drawdown*, karena pasang surut merupakan suatu kondisi muka air sungai naik turun secara periodik sehingga mempengaruhi kondisi muka air tanah, dan hal tersebut berbeda dengan kondisi surut tiba-tiba (*drawdown*).

Maksud dari penelitian ini adalah melakukan analisis kestabilan lereng jenuh sebagian di tebing sungai yang dipengaruhi pasang surut dengan nilai koefisien permeabilitas berbeda, sehingga parameter kuat geser tanah disamakan. Analisis dilakukan secara numerik dengan menggunakan analisis ganda pada Program PLAXIS 2D yang berbasis Metode Elemen Hingga sedangkan tujuannya adalah untuk menganalisis pengaruh pasang surut terhadap stabilitas lereng yang homogen dengan dua nilai koefisien permeabilitas yang berbeda (permeabilitas tinggi dan permeabilitas rendah) dan dengan kemiringan lereng yang berbeda menggunakan analisis ganda secara numerik. Tingkat kestabilan lereng ini ditunjukkan dengan nilai faktor keamanan.

Kestabilan lereng alami yang terbentuk oleh alam dapat mengalami kelongsoran akibat beberapa hal, salah satunya yaitu kenaikan muka air tanah (Rahardjo, 2012). Kenaikan muka air tanah sendiri dapat terjadi karena infiltrasi air hujan, pembangunan dan pengisian waduk, drainase yang

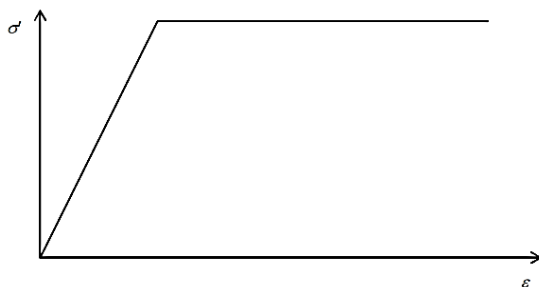
rusak, dan saat terjadi pasang. Selain kenaikan muka air tanah, turunnya muka air tanah secara signifikan pun akan mengakibatkan kelongsoran (Rahardjo, 2012). Lereng yang mengalami penurunan muka air secara tiba-tiba, yaitu jika muka air pada tepi lereng menurun dengan cepat maka nilai faktor keamanan lereng tersebut akan menurun. Pada tanah lempung, pengaruh penurunan muka air secara tiba-tiba didekati dengan mereduksi nilai parameter tanah berupa ϕ menjadi ϕ^* untuk menghitung nilai faktor keamanan, seperti ditunjukkan pada persamaan berikut (Rahardjo, 2012):

$$\phi^* = \phi \times \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \quad (1)$$

Kriteria keruntuhan Mohr Coulomb (plastis sempurna) pada pemodelan material tanah

Terbentuknya regangan pada tanah yang mengakibatkan bentuk tanah tidak dapat kembali seperti semula, maka tanah tersebut sudah bersifat plastis. Sebuah fungsi leleh atau disebut dengan *yield function* (f) dapat digunakan sebagai fungsi regangan dan tegangan untuk mengevaluasi apakah plastisitas telah terjadi pada tanah (Brinkgreve *et al.*, 2016). Menurut Brinkgreve *et al.* (2016) kondisi tegangan yang ditunjukkan oleh titik-titik berada di bawah fungsi atau bidang leleh, maka titik-titik tersebut memiliki perilaku yang sepenuhnya elastis dan seluruh regangan dapat kembali seperti semula.

Prinsip dasar dari model elastis-plastis menyatakan bahwa regangan dan perubahan regangan dibedakan menjadi dua yaitu bagian elastis dan bagian plastis (Brinkgreve *et al.*, 2016).



Gambar 1. Prinsip model elastis-plastis- sempurna (Brinkgreve *et al.*, 2016)

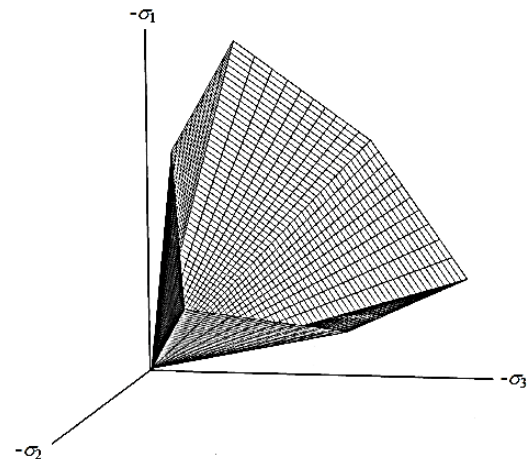
Pada Gambar 1 bidang plastis ditunjukkan dengan garis konstan dimana dengan tegangan yang konstan regangan semakin besar sehingga regangan tidak akan kembali seperti semula.

Kondisi leleh pada Pemodelan Mohr-Coulomb merupakan muai hukum friksi dari Coulomb ke kondisi tegangan secara umum (Brinkgreve *et al.*,

2016). Dua buah parameter penting, yaitu sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) yang muncul dalam fungsi leleh dari model plastis. Parameter tersebut mempengaruhi kuat geser tanah. Menurut Mohr (1900), persamaan kriteria keruntuhan Mohr Coulomb dapat ditulis menjadi sebagai berikut:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (2)$$

Dimana τ_f adalah kuat geser tanah, σ adalah tegangan normal, c adalah kohesi (kPa), ϕ adalah sudut geser ($^\circ$). Hubungan tersebut dapat menghasilkan sebuah garis lurus atau biasa disebut garis keruntuhan.



Gambar 2. Bidang leleh Mohr-Coulomb dalam ruang tegangan utama ($c = 0$) (Brinkgreve *et al.*, 2016).

Analisis stabilitas lereng dengan *Finite Element Method* (FEM)

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng, salah satunya yaitu metode berbasis numerik. Metode numerik memiliki beberapa keuntungan dalam menganalisis kestabilan lereng, yaitu dapat digunakan untuk analisis lereng dengan longsoran yang kompleks, dapat memasukkan kondisi regangan tegangan yang ada pada lereng dalam perhitungan kestabilan lereng, dapat menggunakan berbagai macam kriteria keruntuhan, dan dapat dengan mudah memasukkan efek perkuatan pada lereng.

Salah satu metode numerik yang sering digunakan saat ini, yaitu Metode Elemen Hingga (*Finite-Element Method*). Dalam analisis stabilitas lereng terdapat pendekatan umum yang digunakan pada Metode Elemen Hingga, yaitu metode pengurangan kekuatan geser (*strength reduction method*) dalam mendapatkan nilai faktor keamanan. Metode pengurangan kuat geser memiliki prinsip dengan mereduksi/mengurangi secara bertahap nilai kekuatan geser material

sampai membentuk suatu mekanisme keruntuhan tanah pada lereng (Brinkgreve *et al.*, 2016). Nilai parameter kuat geser tanah berupa nilai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ) yang akan direduksi, yaitu dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$c_f = \frac{c}{SRF} \quad (3)$$

$$\phi_f = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{SRF}\right) \quad (4)$$

Nilai SRF merupakan nilai faktor reduksi kekuatan geser, dan nilai faktor keamanan (SF) besarnya sama dengan nilai SRF pada saat tepat terjadi keruntuhan.

Kuat geser tanah jenuh sebagian (*unsaturated soil*)

Tanah di alam secara alami dapat dibagi menjadi dua, yaitu tanah kondisi jenuh sempurna (*fully saturated*) dan tanah kondisi jenuh sebagian (*partially saturated*). Perbedaan kondisi kejenuhan tanah ini dapat disebabkan oleh adanya perbedaan fase air yang membentuk suatu massa tanah (Muntaha, 2010).

Kondisi pada tanah jenuh sebagian, air hanya mengisi sebagian dari volume pori dan sisanya terisi oleh udara. Pada tanah jenuh sebagian, Teori Terzaghi mengenai tegangan efektif klasik dan koefisien *suction* (χ) telah dimodifikasi menjadi persamaan berikut ini (Bishop, 1959):

$$\sigma' = (\sigma - p_a) + \chi(p_a - p_w) \quad (5)$$

Dimana σ' adalah tegangan efektif, σ adalah tegangan total, p_a adalah tekanan udara pori, p_w adalah tekanan *suction*.

Nilai $(p_a - p_w)$ merupakan nilai tekanan air negatif atau yang biasa disebut *suction* dan χ adalah nilai koefisien *suction*. Nilai koefisien *suction* bervariasi dari nol sampai satu tergantung kondisi tanah, yaitu dalam kondisi kering sampai jenuh. Nilai satu ketika kondisi tanah jenuh, sehingga persamaan menjadi (Hamdhan, 2013):

$$\sigma' = (\sigma - p_w) \quad (6)$$

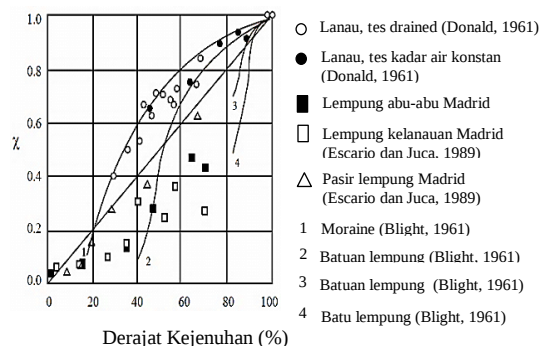
Dan ketika kondisi tanah kering dengan nilai nol, maka persamaan menjadi:

$$\sigma' = (\sigma - p_a) \quad (7)$$

Pada saat kondisi tanah kering, tegangan efektif akan sama dengan tegangan total dikarenakan nilai tekanan udara pori dapat diasumsikan sangat kecil bahkan tidak ada ($p_a \approx 0$), sedangkan untuk mendapatkan nilai koefisien *suction* diperlukan pengujian laboratorium. Akan tetapi diperlukan waktu yang cukup lama dan biaya yang tinggi

dalam menguji tanah kondisi jenuh sebagian. Oleh karena itu Vanapalli *et al* (1996) melakukan penelitian mengenai hubungan antara nilai c dengan *degree of saturation* atau *effective degree of saturation* (S_e) yang disajikan pada Gambar 3, sehingga diperoleh persamaan yang lebih sederhana, yaitu:

$$\sigma' = \sigma - S_e p_w \quad (8)$$



Gambar 3. Grafik hubungan antara koefisien suction (χ) dengan nilai *degree of saturation*. (Vanapalli *et al.*, 1996)

Pada kondisi tanah jenuh sebagian, istilah tanah tidak jenuh tidak berarti bahwa tanah tersebut memiliki nilai derajat kejenuhan sebesar nol, tetapi hanya menggambarkan bahwa derajat kejenuhannya tidak mencapai 100% (Muntaha, 2010). Pada saat kondisi ini, istilah tanah tidak jenuh dapat dikenakan pada semua jenis tanah yang memiliki tegangan air negatif (Fredlund *et al.*, 1995).

Persamaan yang digunakan dalam menentukan kekuatan geser pada tanah jenuh sebagian, yaitu sebagai berikut (Fredlund *et al.*, 1978) adalah

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (9)$$

Dengan ϕ^b merupakan sudut yang menunjukkan tingkat kenaikan kekuatan geser relatif terhadap *matric suction*. Sedangkan ϕ' merupakan sudut yang menunjukkan tingkat kenaikan kekuatan geser berkenaan dengan tegangan normal.

Aliran air pada tanah jenuh sebagian (*unsaturated soil*)

Aliran air pada kondisi tanah jenuh sebagian memiliki beberapa dasar, diantaranya (Hamdhan, 2013):

1) Hukum Darcy

Hukum ini menganggap bahwa laju aliran air melalui massa tanah sebanding dengan gradien hidraulik (Darcy, 1856). Persamaan Darcy dapat dinyatakan dengan Persamaan 10.

$$\nabla \rho_w + \rho_w g + \varphi = 0 \quad (10)$$

Dengan g adalah vektor percepatan gravitasi, φ adalah vektor dari gaya gesekan, persatuan volume, antara fluida yang mengalir dan kerangka tanah.

2) Kompresibilitas air

Persamaan kompresibilitas air untuk aliran air pada tanah tidak jenuh (Bishop & Eldin, 1950; Fredlund dan Rahardjo, 1993):

$$\beta = S\beta_w + \frac{1-S+hS}{K_{air}} \quad (11)$$

Dimana S merupakan derajat kejenuhan, β_w merupakan kompresibilitas air murni ($4,58 \times 10^{-7} \text{ kPa}^{-1}$), h merupakan koefisien volumetrik kelarutan udara (0,2), K adalah modulus *bulk* udara

Persamaan 11 disederhanakan dengan tidak memasukkan nilai kelarutan udara, sehingga menjadi Persamaan 12 (Verruijt, 2001):

$$\beta = S\beta_w + \frac{1-S}{K_{air}} \quad (12)$$

3) Model hidraulik

Pada tanah kondisi jenuh sebagian, parameter hidraulik aliran air tanah dijelaskan oleh kurva karakteristik tanah - air/ *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC). Kurva SWCC menggambarkan mengenai kapasitas tanah untuk menyimpan air pada tekanan yang berbeda (Hamdhan, 2013). Salah satu model yang diperkenalkan oleh Van Genuchten (1980) mengenai hubungan antara kejenuhan dan *suction pore pressure head* dalam menggambarkan perilaku hidraulik pada tanah jenuh sebagian, yaitu dengan Persamaan 13 dan 14.

$$S(\phi_p) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res})[1 + (g_a|\phi_p|)^n]^{-g_c} \quad (13)$$

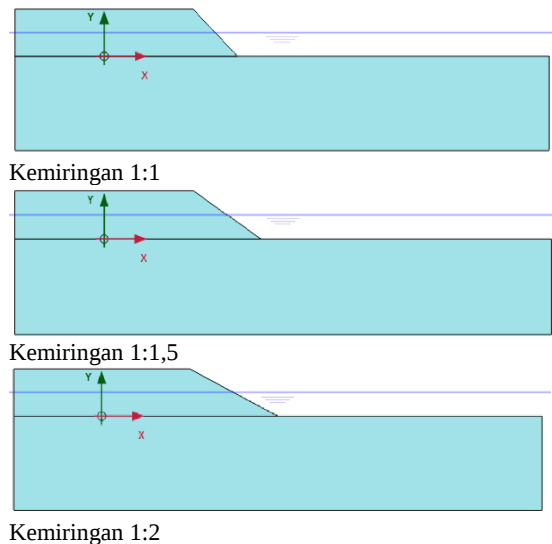
$$\phi_p = \frac{p_w}{\rho_w g} \quad (14)$$

Metode

Pemodelan lereng dengan program plaxis 2D

Pemodelan lereng dilakukan untuk mengetahui pengaruh pasang surut pada lereng sungai dengan kemiringan lereng yang berbeda. Dalam pemodelan analisis stabilitas lereng dibuat menjadi tiga jenis kemiringan, yaitu 1:1, 1:1,5, dan 1:2 dengan tinggi lereng 5 m seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Analisis dilakukan pada satu lapisan tanah yang homogen, yaitu pada tanah dengan permeabilitas tinggi dan rendah. Adapun

tinggi muka air (h) yang dimodelkan yaitu 2.5 m dari dasar lereng seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

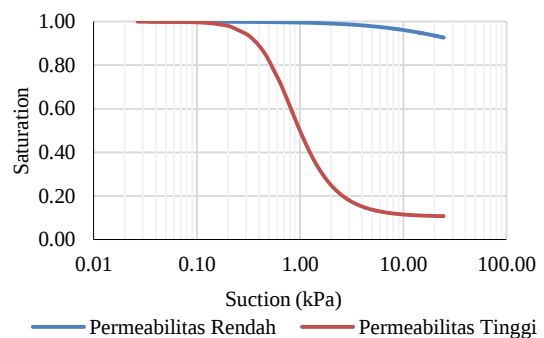


Gambar 4. Pemodelan variasi kemiringan lereng.

Parameter tanah yang digunakan pada pemodelan ini disamakan, yang berbeda hanya parameter hidrauliknya saja, yaitu g_{unsat} sebesar 16 kN/m^3 ; g_{sat} sebesar 17 kN/m^3 ; E' sebesar 6.250 kN/m^2 ; v' sebesar 0,3; c' sebesar 20 kN/m^2 ; ϕ' sebesar 20° ; k sebesar $0,04752 \text{ m/hari}$ (permeabilitas rendah); k sebesar 7.128 m/hari (permeabilitas tinggi).

Berdasarkan parameter hidraulik di atas, yaitu koefisien permeabilitas (k) maka dapat disusun kurva karakteristik tanah - air (SWCC) yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Parameter hidrolik aliran air tanah di zona tak jenuh (di atas permukaan freatik) dijelaskan oleh kurva karakteristik air tanah (SWCC). SWCC merupakan masukan penting untuk analisis rembesan transien di tanah tak jenuh. SWCC adalah ukuran kapasitas penyimpanan air tanah untuk isap tanah tertentu (Ng & Pang, 2000).

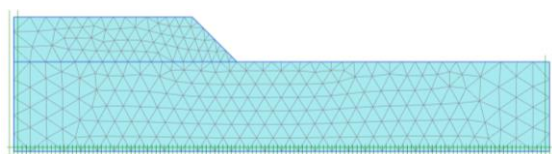


Gambar 5. Kurva SWCC (*Soil Water Characteristic Curves*)

Soil Water Characteristic Curves (SWCC) dapat digunakan untuk memprediksi sifat tanah tak jenuh seperti koefisien permeabilitas tak jenuh dan kekuatan geser tak jenuh seperti yang digambarkan oleh Fredlund (2000) dan Fredlund et al (1995, 2011).

Penentuan jenis *mesh* pada pemodelan

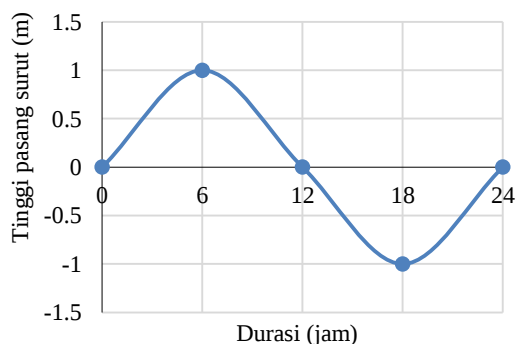
Penentuan jenis *mesh* pada analisis pemodelan lereng akibat pasang surut ini, yaitu *very fine*. Dalam menentukan jenis *mesh* dapat mempengaruhi ketelitian hasil analisis yang dilakukan. Semakin baik jenis *mesh*, maka tingkat ketelitian hasil analisis pun akan semakin baik. Akan tetapi semakin baik jenis *mesh* yang dipilih, maka waktu yang dibutuhkan untuk kalkulasi akan semakin lama. Adapun *mesh* pada lereng ini ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tampilan jaring-jaring mesh jenis *very fine*

Pemodelan pasang surut dengan Program Plaxis 2D

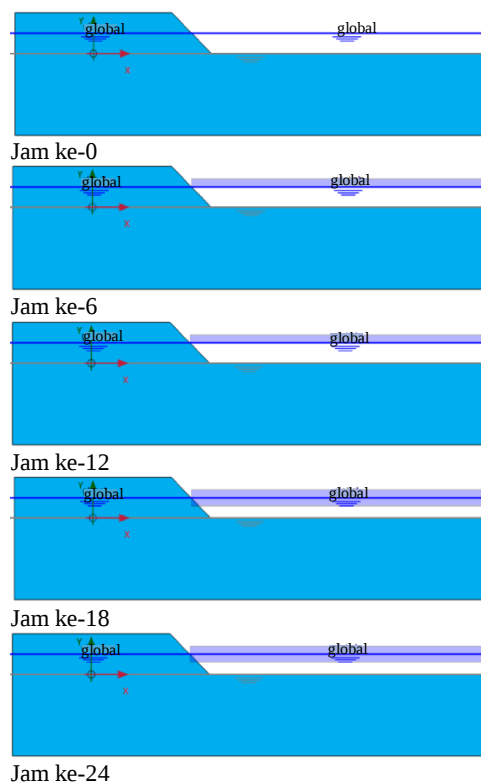
Tunggang pasang surut yang dimodelkan yaitu satu meter dengan jenis pasang surut tunggal (*diurnal*), dimana durasi yang digunakan selama satu hari atau 24 jam. Pemodelan pasang surut pada Program Plaxis 2D menggunakan *flow function*, adapun kondisi pasang surut yang akan digunakan pada pemodelan disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kondisi batas pasang surut pada lereng

Analisis dalam menentukan nilai faktor keamanan dilakukan pada saat muka air normal/rata – rata (jam ke – 0), pasang maksimum (jam ke – 6), pertengahan antara pasang surut (jam ke – 12),

surut minimum (jam ke – 18), dan saat kembali ke muka air normal / rata-rata (jam ke – 24). Adapun kondisi muka air pasang dan surut pada jam – jam berikut ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Gambar pemodelan pasang purut pada lereng kemiringan 1:1

Analisis stabilitas lereng akibat pasang surut dengan Program Plaxis 2D

Analisis stabilitas lereng dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu pada tahap awal: *gravity loading*, dilakukan perhitungan tegangan awal (*initial stress*) yang memperhitungkan berat tanah di atasnya (*gravity loading*). Tahap kedua: analisis ganda (*fully coupled*), dilakukan analisis ganda antara analisis deformasi dan analisis aliran air dalam tanah. Dalam tahapan ini, diperhitungkan kondisi batas pasang surut dengan interval waktu selama 24 jam seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Tahap ketiga: analisis faktor keamanan (*safety factor*), dilakukan perhitungan nilai faktor keamanan lereng di sungai yang dipengaruhi pasang surut dengan menggunakan metode pengurangan kekuatan geser (*strength reduction method*).

Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis stabilitas lereng berupa nilai faktor keamanan pada setiap kondisi pemodelan akibat pasang surut disajikan pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1 Resume hasil analisis pengaruh pasang surut pada pemodelan lereng permeabilitas rendah

Waktu (jam)	SF dengan kemiringan lereng		
	1:1	1:1,5	1:2
0	2,537	2,774	2,958
6	2,999	3,320	3,559
12	2,522	2,774	2,948
18	2,228	2,418	2,563
24	2,552	2,784	2,959

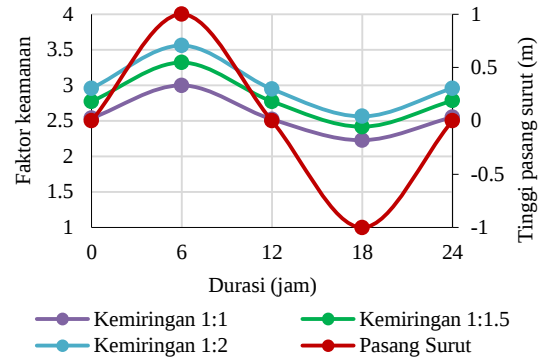
Hasil analisis berupa nilai faktor keamanan yang disajikan pada Tabel 1 dan 2 menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan terbesar dari setiap kemiringan dan jenis tanah, yaitu terjadi pada saat jam ke-6 yang merupakan kondisi pasang maksimum. Sedangkan nilai faktor keamanan terkecil terjadi saat jam ke-18 yang merupakan kondisi surut minimum. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai faktor keamanan terbesar pada tanah dengan permeabilitas rendah terjadi pada lereng dengan kemiringan 1:2 kondisi saat kondisi air pasang pasang di jam ke-6, yaitu dengan nilai faktor keamanan sebesar 3,559. Sedangkan untuk tanah dengan permeabilitas tinggi, nilai faktor keamanan terbesar terjadi pada lereng dengan kemiringan 1:2 saat kondisi air pasang di jam ke-6, yaitu dengan nilai faktor keamanan sebesar 3,669.

Tabel 2. Resume hasil analisis pengaruh pasang surut pada pemodelan lereng permeabilitas tinggi

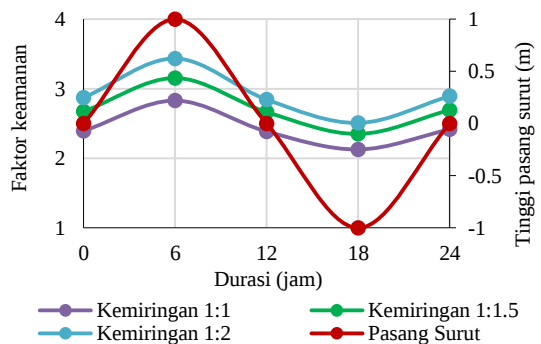
Waktu (jam)	SF dengan kemiringan lereng		
	1:1	1:1,5	1:2
0	2,394	2,673	2,872
6	2,830	3,154	3,435
12	2,386	2,665	2,845
18	2,128	2,351	2,509
24	2,416	2,695	2,895

Dari hasil analisis pun menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan untuk tanah permeabilitas rendah lebih besar dibandingkan dengan tanah permeabilitas tinggi. Hal tersebut terjadi karena pada tanah dengan nilai permeabilitas rendah memiliki nilai derajat kejenuhan (*saturation*) yang lebih tinggi dibanding tanah permeabilitas tinggi. Semakin besar nilai derajat kejenuhan, maka semakin besar nilai kekuatan tanah (*shear strength*), karena nilai tekanan air pori negatif (*suction*) akan semakin meningkat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Adapun hasil analisis berupa grafik antara durasi dan faktor keamanan untuk tanah permeabilitas rendah yang ditunjukkan pada Gambar 9, sedangkan untuk tanah permeabilitas tinggi ditunjukkan pada Gambar 10.

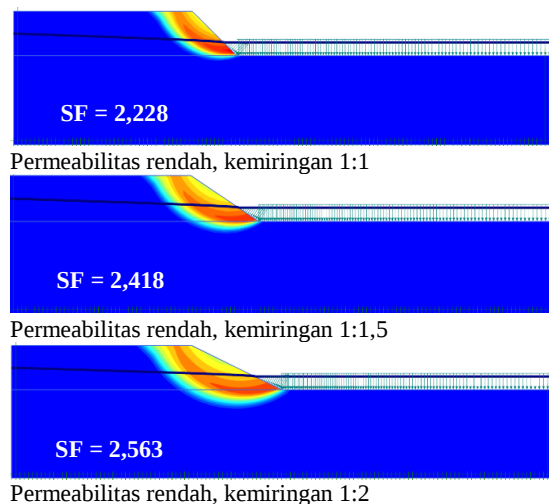


Gambar 9. Grafik hasil analisis antara durasi dan faktor keamanan untuk tanah dengan permeabilitas rendah.



Gambar 10. Grafik hasil analisis antara durasi dan faktor keamanan untuk tanah dengan permeabilitas tinggi.

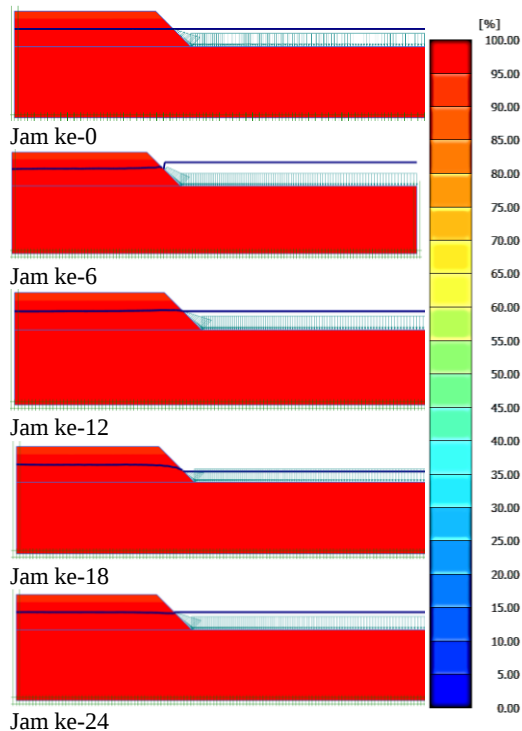
Dari grafik dapat dilihat bahwa kurva nilai faktor keamanan mengikuti kurva pasang surut, yaitu dimana kurva pasang surut naik maka kurva faktor keamanan pun naik. Nilai faktor keamanan minimum terjadi pada saat jam ke-18 atau pada saat muka air sungai surut, adapun bidang gelincir pada saat nilai faktor minimum terkecil yang disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Gambar bidang gelincir di lereng tanah permeabilitas rendah pada periode 18 jam

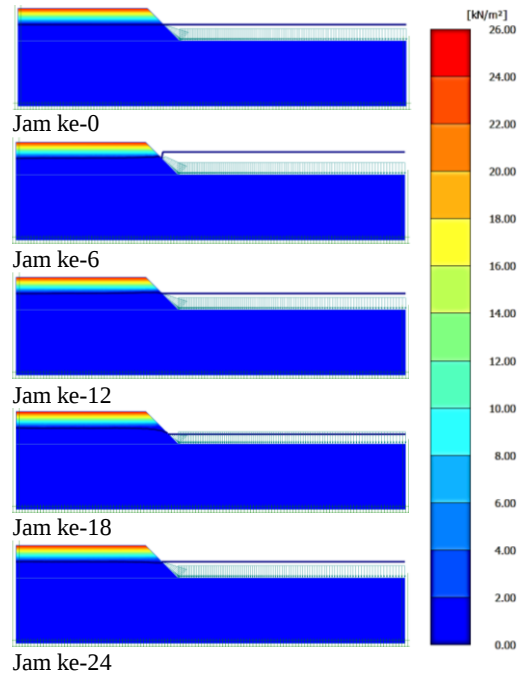
Dari hasil analisis berupa gambar bidang gelincir dapat dilihat bahwa pada ketiga variasi kemiringan, yaitu 1:1, 1:1,5, dan 1:2 bidang longsor yang terjadi merupakan *toe failure* atau kelongsoran di kaki lereng. Adapun gambar diagram *saturation* dan *suction* untuk tanah dengan permeabilitas rendah ditunjukkan pada Gambar 12 dan 13. Sedangkan untuk tanah permeabilitas tinggi ditunjukkan pada Gambar 14 dan 15.

Pada Gambar 12 menunjukkan bahwa dengan nilai permeabilitas rendah yaitu sebesar 0,04752 m/hari proses kejenuhan tanah pun akan membutuhkan waktu yang lebih lama. Akan tetapi dari hasil analisis, didapat bahwa tanah dengan permeabilitas rendah memiliki nilai kejenuhan yang tinggi dengan ditunjukkan dengan warna merah. Dari hasil analisis pun ditunjukkan bahwa nilai minimum *saturation* terjadi pada saat surut (jam ke-18) yaitu sebesar 92,54%.



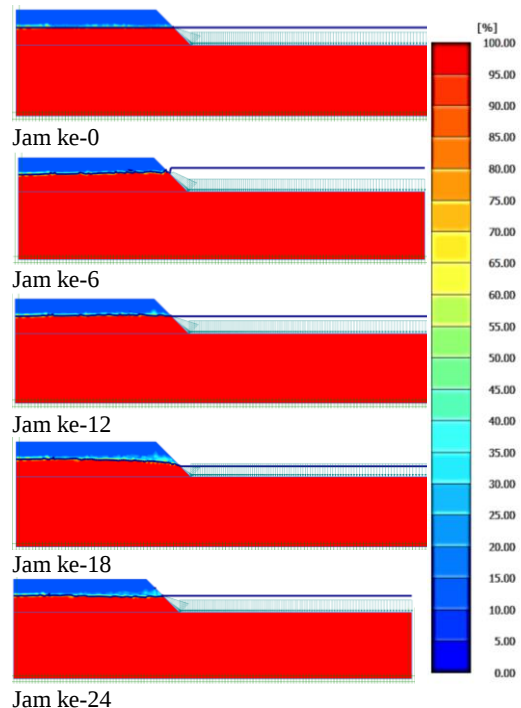
Gambar 12. Diagram *saturation* pada tanah dengan permeabilitas rendah di lereng 1:1.

Adapun diagram *suction* yang ditunjukkan pada Gambar 13, dapat dilihat bahwa terdapat tekanan air pori negatif atau *suction* di atas muka air. Nilai *suction* di atas muka air bervariasi, semakin jauh dari muka air tanah maka nilai *suction* bertambah besar. Adapun nilai *suction* maksimum yaitu sebesar 25,35 kN/m² yang terjadi pada saat surut (jam ke-18).



Gambar 13. Diagram *suction* pada tanah dengan permeabilitas rendah di lereng 1:1.

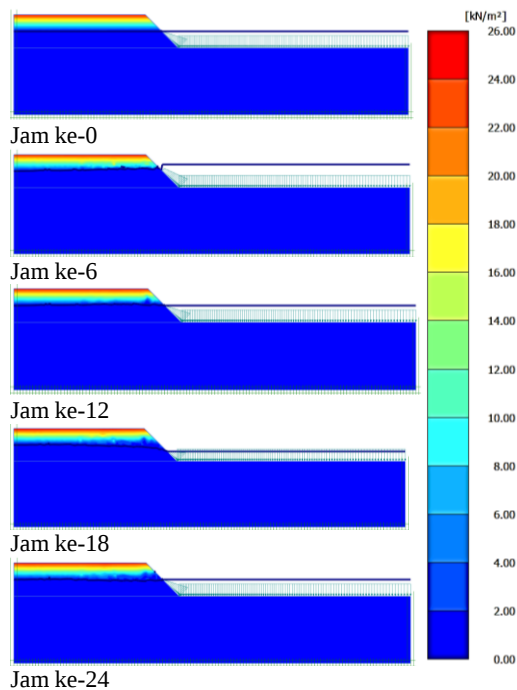
Pada Gambar 14 menunjukkan bahwa dengan nilai permeabilitas tinggi yaitu sebesar 7,128 m/hari, proses kejenuhan tanah pun akan membutuhkan waktu yang lebih cepat dibandingkan dengan tanah yang memiliki permeabilitas yang rendah.



Gambar 14. Diagram *saturation* dan diagram *suction* pada tanah dengan permeabilitas tinggi di lereng 1:1.

Dapat dilihat pada gambar, bahwa tanah dengan permeabilitas tinggi memiliki nilai kejenuhan yang rendah dengan ditunjukkan dengan warna biru di atas muka air tanah. Dari hasil analisis pun ditunjukkan bahwa nilai minimum *saturation* terjadi pada saat inisial (jam ke-6) yaitu sebesar 0%.

Diagram *suction* yang ditunjukkan pada Gambar 15, dapat dilihat bahwa terdapat tekanan air pori negatif atau *suction* di atas muka air. Nilai *suction* di atas muka air bervariasi, semakin jauh dari muka air tanah maka nilai *suction* bertambah besar. Adapun nilai *suction* maksimum yaitu sebesar 25,87 kN/m² yang terjadi pada saat surut (jam ke-18).



Gambar 15. Diagram *suction* pada tanah dengan permeabilitas tinggi di lereng 1:1.

Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis stabilitas lereng yang memperhitungkan analisis ganda antara analisis deformasi dan analisis aliran air dalam tanah akibat pasang surut pada dua jenis tanah, yaitu tanah dengan permeabilitas tinggi dan rendah dapat disimpulkan bahwa tinggi pasang surut dapat mempengaruhi kestabilan lereng. Semakin tinggi posisi muka air (pada kondisi pasang), maka nilai faktor keamanan akan semakin besar, hal tersebut diakibatkan karena adanya penambahan tekanan hidrostatik dari air yang menahan gaya yang melongsorkan. Begitu pula sebaliknya, semakin rendah posisi muka air (pada kondisi susut) maka nilai faktor keamanan akan semakin kecil akibat

pengurangan tekanan hidrostatik. Adapun nilai faktor keamanan untuk tanah dengan permeabilitas rendah lebih besar dibandingkan dengan tanah permeabilitas tinggi.

Selain posisi muka air sungai, kemiringan lereng pun mempengaruhi besarnya nilai faktor keamanan. Semakin landai kemiringan lereng, maka nilai faktor keamanan akan semakin besar.

Dari hasil analisis stabilitas lereng dengan kondisi nilai permeabilitas yang berbeda, pasang surut tidak mempengaruhi nilai faktor keamanan secara signifikan yaitu perbedaannya hanya sebesar 4%.

Daftar Pustaka

Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad*, 106(39), 859 – 863.

Bishop, A. W., Eldin, A. K. G. (1950). Undrained triaxial test on saturated sands and their significance in the general theory of shear strength. *Géotechnique*, 2, 13 – 32.

Brinkgreve, R. B. J. Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P. G., & Haxaire, A. (2016). *Reference Manual*, PLAXIS, Netherlands.

Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de dijon*. Paris: Dalmont.

Das, B. M. (1985). *Mekanika tanah, prinsip-prinsip rekayasa geoteknis jilid 2*. Jakarta: Erlangga.

Donkers, J. J. (1964). *Tidal computations in rivers and coastal waters*. Amsterdam: North – Holland Publishing Company.

Fredlund, D. G. (2000). The 1999 R. M. Hardy lecture: the impementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 963-986.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R.A. (1978). The shear strength of unsaturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York : Wiley.

Fredlund, D. G., Sheng, D., & Zhao, J. (2011). Estimation of soil suction from the soil–water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2), 186-198.

- Fredlund, D. G., Xin, A., & Barbour, S. L. (1995). The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 440-448.
- Hamdhan, I. N. (2013). A contribution to slope stability analysis with the Finite Element Method, *Dissertation*, Technische Universität Graz.
- Mohr, O. (1900). Welche umstände bedingen die elastizitätsgrenze und den bruch eines materiales?. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 44, 1524-1530.
- Muntaha, M. (2010). Pemodelan infiltrasi air ke dalam tanah dengan alat “kolom infiltrasi” untuk menghitung koefisien permeabilitas tanah tidak jenuh. *Jurnal APLIKASI ISSN. ISSN. 1907-753X*, 8(1), 35-42.
- Ng, C. W. W., & Pang, Y. W. (2000). Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(2), 157-166.
- Putra, A. S. (2014). Analisis distribusi kecepatan aliran sungai musi (ruas sungai: Pulau Kemaro sampai dengan muara Sungai Komering). *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 2(3), 603-608.
- Rahardjo, P. P. (2012). *Manual kestabilan lereng*. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379-392.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Verruijt, A. (2001). *Soil mechanics*. Netherlands: Delft University of Technology.
- Wyrski, K. (1961). *Physical oceanography of the south east asian waters*. California: Institute Oceanography.