

ANALISA STABILITAS LERENG *LIMIT EQUILIBRIUM* vs *FINITE ELEMENT METHOD*

Ir. GOUW Tjie Liong, M.Eng, ChFC

Fakultas Teknik Sipil, Universitas Bina Nusantara

Dave Juven George Herman

Fakultas Teknik Sipil, Universitas Bina Nusantara

ABSTRAK

Analisa stabilitas lereng merupakan analisa yang sering kali perlu dilakukan, karena hampir setiap pekerjaan konstruksi sering kali melibatkan pembuatan lereng, seperti: galian, timbunan dan konstruksi di atas lereng. Metode yang dipakai dalam analisa stabilitas lereng pada umumnya adalah metode Limit Equilibrium. Seiring dengan perkembangan teknologi komputer, berkembang pula aplikasi metode Finite Element untuk analisa kestabilan lereng. Berbeda dengan metoda Limit Equilibrium dimana bidang longsor ditentukan terlebih dahulu, metoda Finite Element mencari bidang kelongsoran dengan mencari titik-titik/bidang lemah di dalam tanah. Potensi bidang longsor dicari dengan jalan mengurangi kuat geser tanah secara bertahap. Metoda ini dikenal dengan nama Strength Reduction atau Phi-C Reduction Method. Sering timbul pertanyaan dari para praktiksi teknik sipil, apakah faktor keamanan yang dihasilkan dari metoda Finite Element ini sama dengan metoda Limit Equilibrium yang sudah dikenal luas. Makalah ini menyajikan hasil studi perbandingan antara kedua metoda tersebut. Didapatkan bahwa bahwa nilai faktor keamanan dan prediksi pola keruntuhan dari kedua metode tersebut memiliki kecenderungan hasil yang sama dimana persentase perbedaan dari hasil analisa kedua metoda tersebut masih dalam batas yang bisa diterima ($\pm 5\%$).

Kata kunci : Stabilitas Lereng, *Limit Equilibrium*, *Finite Element*

ABSTRACT

Very often many construction jobs involve slope construction, e.g. open cut excavation, retaining wall, construction on sloping ground etc., other than that stability of embankment and natural slopes also need to be evaluated. In such cases slope stability is one of the important factor to be analyzed. Conventional Limit Equilibrium Method (LEM), e.g. Method of Slices is widely used. With the advance of computer technology, Finite Element Method (FEM) is getting more and more popular, this is also the case in the analysis of slopes. Unlike LEM where the mode of failure is predetermined, FEM locates the potential failure surface by searching the weak points in the ground. Potential failure surface is searched by reducing the soil shear strength. It is known as Strength Reduction or Phi-C Reduction Method. The question often encountered is whether this FEM yield the same safety factor as the conventional LEM method. This paper presents the results of comparative study conducted by both method. It was found that the value of safety factor and the predicted collapse pattern of both methods have similar results. Largest difference of safety factor was still within tolerable limits (around 5%).

Keyword : *Slope Stability*, *Limit Equilibrium*, *Finite Element*

1. PENDAHULUAN

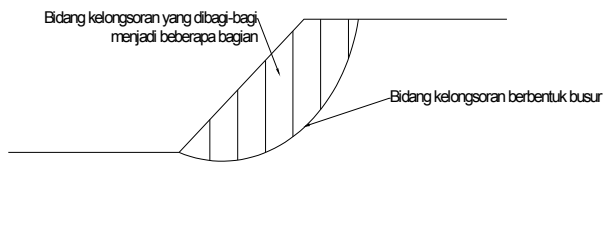
Dalam analisa stabilitas lereng terdapat dua metoda yang dipakai yaitu metoda keseimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*, *LEM*) dan metoda elemen hingga (*Finite Element Method*, *FEM*). Menghadapi dua metoda perhitungan ini, seringkali para praktiksi dan akademisi dihadapkan pada pertanyaan, manakah diantara kedua metoda

tersebut yang lebih tepat dan lebih mendekati kenyataan. Untuk menjawab pertanyaan tersebut penulis melakukan studi perbandingan antara LEM vs FEM, mencari tahu apakah dua cara tersebut menghasilkan faktor keamanan yang sama, dan manakah diantara kedua metode tersebut yang paling mendekati kenyataan bila dibandingkan dengan kondisi nyata di lapangan. Dalam hal yang terakhir ini dilakukan hitung balik terhadap

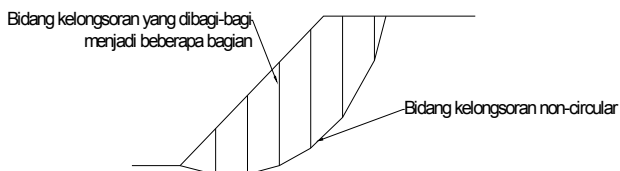
beberapa lereng yang mengalami keruntuhan dengan menggunakan kedua cara tersebut. Analisis LEM dilakukan dengan menggunakan program SlopeW dari Geostudio 2007 dan analisa kestabilan lereng dilakukan dengan memakai metoda yang dikembangkan oleh Fellenius (*ordinary method of slice*), Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, Spencer dan Sarma. Sedangkan analisis FEM digunakan dengan menggunakan program Plaxis 2D.

2. LIMIT EQUILIBRIUM METHOD (LEM)

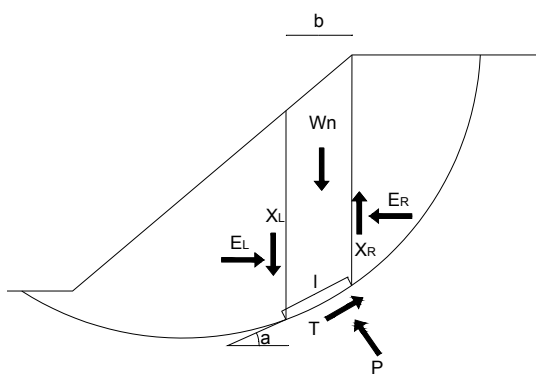
LEM adalah metode yang menggunakan prinsip kesetimbangan gaya. Metoda analisis ini pertama-tama mengasumsikan bidang kelongsoran yang dapat terjadi. Terdapat dua asumsi bidang kelongsoran yaitu: bidang kelongsoran berbentuk *circular* dan bidang kelongsoran yang diasumsikan berbentuk *non-circular* (bisa juga *planar*).



Gambar 1 - Bidang Longsor Circular



Gambar 2- Bidang Longsor Non-Circular



Gambar 3 Gaya yang bekerja pada bidang irisan

Perhitungan dilakukan dengan membagi-bagi tanah yang berada dalam bidang longsor

dalam irisan-irisan sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 1 hingga Gambar 3, karena itu metoda ini dikenal juga dengan nama metoda irisan (*method of slice*). Gambar 3 yang menggambarkan massa tanah dan gaya-gaya yang bekerja pada irisan. Berbagai solusi yang berbeda untuk metode irisan ini telah dikembangkan selama bertahun-tahun, dimulai dari Fellenius, Taylor, Bishop, Morgenstern-Price hingga Sarma dan lainnya. Perbedaan antara cara yang satu dengan yang lain tergantung pada persamaan kesetimbangan batas dan asumsi gaya kekuatan antar irisan (*interslice force*) yang diperhitungkan.

Fellenius merupakan orang pertama yang mempublikasikan metoda irisan ini dan merupakan cara yang paling sederhana. Pada cara Fellenius semua gaya antar irisan diabaikan dan hanya memperhitungkan kesetimbangan momen. Bishop kemudian mengembangkan cara yang lebih kompleks dengan memasukkan gaya yang bekerja di sekitar bidang irisan, namun tetap melakukan perhitungan dengan kesetimbangan momen. Bishop juga mengeluarkan cara yang dikenal dengan nama Metode Bishop Sederhana (*Simplified Bishop Method*) dimana gaya normal antar irisan diperhitungkan tetapi gaya geser antar irisan diabaikan. Janbu mengembangkan metoda yang mirip dengan metoda sederhana Bishop. Perbedaannya adalah metoda Janbu diturunkan dari kesetimbangan gaya horisontal. Tabel 1 dan 2 menunjukkan perbedaan antar metoda yang dikenal dalam LEM.

Tabel 1 Kesetimbangan yang Diperhitungkan pada masing-masing Cara

Cara	Kesetimbangan Momen	Kesetimbangan Gaya
Ordinary / Fellinius	Ya	Tidak
Bishop's Simplified	Ya	Tidak
Janbu's Simplified	Tidak	Ya
Morgenstern Price	Ya	Ya
Spencer	Ya	Ya
Sarma	Ya	Ya

Tabel 2 Gaya Antar Irisan yang Bekerja masing-masing Cara

Method	Gaya Normal Antar Irisan (E)	Gaya Geser antar Irisan (X)	Kemiringan resultant X/E dan hubungan antar X-E
Ordinary / Fellinius	Tidak	Tidak	Tidak ada gaya antar irisan
Bishop's Simplified	Ya	Tidak	Horisontal
Janbu's Simplified	Ya	Tidak	Horisontal

Morgenstern Price	Ya	Ya	Variable; user Function
Spencer	Ya	Ya	konstan
Sarma	Ya	Ya	$X = c + E \tan \phi$

Dalam LEM ini faktor keamanan, SF, ada prinsipnya dihitung dari perbandingan antara kuat geser tanah, τ_f , dengan gaya dorong, τ , atau perbandingan antara momen tahanan, RM, terhadap momen dorong, DM, sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan (1) di bawah ini:

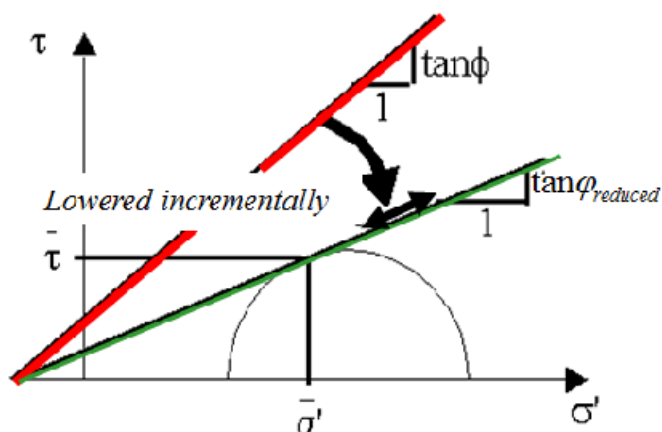
$$SF = \frac{\tau_f}{\tau} \text{ or } SF = \frac{RM}{DM} \dots (1)$$

3. FINITE ELEMENT METHOD (LEM)

Dalam metoda elemen hingga atau FEM, tidak dilakukan asumsi bidang longsor. Faktor keamanan dicari dengan mencari bidang lemah pada struktur lapisan tanah. Faktor keamanan didapatkan dengan cara mengurangi nilai kohesi, c , dan sudut geser dalam tanah, ϕ , secara bertahap hingga tanah mengalami keruntuhan. Nilai faktor keamanan, kemudian dihitung sbb:

$$\sum MSF = \frac{c}{c_{reduced}} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_{reduced}} \dots (2)$$

dengan: $\sum MSF$ = faktor keamanan; $c_{reduced}$ dan $\phi_{reduced}$ = nilai c dan ϕ terendah yang didapat pada saat program Plaxis mengatakan tanah mengalami keruntuhan (*soil body collapse*). Proses perhitungan ini dalam diagram keruntuhan Mohr diilustrasikan pada Gambar 4. Dalam program PLAXIS metode ini disebut "*Phi-c reduction*".



Gambar 4 – Proses Perhitungan Faktor Keamanan dalam FEM

Sebagaimana disebutkan pada pendahuluan bahwa analisa kestabilan dengan FEM ini dilakukan dengan menggunakan program Plaxis. Suatu hal yang perlu dikemukakan disini adalah bahwa dalam analisa Undrained untuk tanah berbutir halus terdapat tiga cara (kemungkinan masukan) di dalam PLAXIS, yaitu:

- Undrained A: Tipe perilaku material dipilih *undrained* dan parameter-parameter masukan yang dipakai adalah parameter kuar geser efektif (c', ϕ', ψ') dan parameter kekakuan efektif (E'_{50}, ν'). Perhitungan undrained dilakukan dalam analisis tegangan efektif.
- Undrained B: Tipe perilaku material dipilih *undrained* dan masukan yang dipakai adalah parameter kuar geser tegangan total ($c=c_u, \phi=0, \psi=0$) dan parameter kekakuan efektif (E'_{50}, ν'). Perhitungan undrained dilakukan dalam analisis tegangan efektif.
- Undrained C: Tipe perilaku material dipilih *drained* dan parameter-parameter yang dipakai sebagai input adalah parameter kuar geser tegangan total ($c=c_u, \phi=0, \psi=0$) dan kekakuan total ($E_u, \nu=0,495$). Perhitungan undrained dilakukan dalam analisis tegangan total.

Perhitungan kondisi Undrained, dilakukan dengan menggunakan ke tiga cara di atas. Bila diperlukan perhitungan kondisi drained, maka semua parameter masukan dalam parameter efektif dan tipe material dipilih drained. Model tanah yang dipakai adalah Model Mohr Coulomb.

4. DATA PROYEK YANG DIGUNAKAN

Untuk studi perbandingan ini diambil data-data dari kasus nyata keruntuhan lereng yang pernah dipublikasikan dan tidak dipublikasikan.

4.1 Timbunan di Malaysia (North South Highway Trial Project, 1989)

Pada tahun 1989, Malaysia melakukan uji coba kestabilan lereng, dimana dilakukan pembuatan lereng timbunan (embankment) di tanah lempung lunak yang dikenal dengan nama Muir clay. Ketinggian timbunan terus ditambah hingga terjadi keruntuhan pada ketinggian 5,4m dengan kemiringan lereng 1V:2H. Parameter tanah timbunan yang digunakan:

• Berat isi tanah timbunan : $\gamma = 20,5 \text{ kN/m}^3$

- Kohesi tanah timbunan : $c' = 14 \text{ kN/m}^2$
- Sudut geser dalam: $\phi = 31^\circ$
- Modulus Kekakuan tanah timbunan: $E_{50}' = 20000 \text{ kN/m}^2$
- Rasio *Poisson* tanah timbunan : 0,35
- Kondisi drained

Tabel 3 Parameter Tanah Dasar pada Percobaan Timbunan di Malaysia

Kedalaman (m)		Jenis Tanah	Parameter						
Dari	Sampai		Cu (kN/m ²)	c' (kN/m ²)	Phi (°)	Berat Isi (kN/m ³)	Poisson Ratio, v'	Eu (kN/m ²)	E' (kN/m ²)
0	2	Crust	23	8	12,5	18	0,35	11500	10350
2	5	Lempung sangat lunak	16	14	14	15	0,3	4000	3467
5	8		22	22	7	16	0,3	5000	4333
8	11	Lempung lunak Kelanauan	17	9	20	16	0,3	4250	3683
11	14		23	16	17	16	0,3	11500	9967
14	20		28	14	21,5	16	0,3	14000	12133

Catatan: Parameter E_u didapatkan dari korelasi dan E' dari rumus $E_u = 1.5 E'/(1+v')$

Tabel 4 Parameter Tanah Dasar pada Proyek B

Kedalaman(m)		Jenis Tanah	Parameter					
Dari	Sampai		Cu (kN/m ²)	Phi (°)	Berat Isi (kN/m ³)	Poisson Ratio, v'	Eu (kN/m ²)	E' (kN/m ²)
0	2	Lempung Kelanauan	9	0	14,8	0,3	2250	2025
2	4		16	0	16	0,3	4000	3467
4	8		28	0	17,5	0,3	5000	4333
8	12		12	0	16,5	0,3	3000	2600

kondisi *undrained* dengan modulus kekakuan efektif.

Parameter tanah dasar yang dipakai dalam analisis disajikan pada Tabel 3. Muka air tanah terletak disekitar 0.2-0.5m di bawah permukaan tanah asli.

4.2 Analisa Proyek Keruntuhan yang Tidak Dipublikasi (sebut sebagai Proyek B)

Disini timbunan dengan kemiringan lereng 1V:3H mengalami keruntuhan pada ketinggian 4m. Parameter tanah timbunan ini sbb:

- Berat isi tanah timbunan : $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- Kohesi tanah timbunan : $c' = 0 \text{ kN/m}^2$ (tanah timbunan berupa pasir)
- Sudut geser dalam : $\phi = 36^\circ$
- Modulus Kekakuan tanah timbunan : $E_{50}' = 30000 \text{ kN/m}^2$
- *Poisson ratio* tanah timbunan : 0,35

Timbunan didirikan di atas tanah yang lunak sampai kedalaman sekitar 12m.. Muka air tanah berada 0.5m di bawah permukaan tanah dasar. Jenis tanah dasar adalah lempung kelanauan. Tabel 4 menunjukkan data parameter tanah dasar. Parameter modulus kekakuan efektif didapatkan dari korelasi antara modulus kekakuan dalam

4.3 Percobaan Timbunan Rio de Janeiro

Di proyek ini keruntuhan terjadi pada ketinggian pada ketinggian 3.1m dengan kemiringan lereng 1V:2H. Parameter timbunan yang digunakan:

- Berat isi tanah timbunan : $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
- Kohesi tanah timbunan : $c' = 10 \text{ kN/m}^2$
- Sudut geser dalam: $\phi = 35^\circ$
- Modulus Kekakuan tanah timbunan : $E_{50}' = 20000 \text{ kN/m}^2$
- *Poisson ratio* tanah timbunan : 0,35

Tanah dasar berupa tanah lempung dengan letak muka air tanah berada di sekitar 0,5m dari muka tanah asli. Data tanah yang digunakan disajikan pada Tabel 5.

5. ANALISIS HITUNG BALIK & HASIL

Karena proses pembangunan tanah timbunan dilakukan dengan relatif cepat, maka analisa kestabilan lereng dilakukan pada kondisi undrained untuk tanah dasar dan drained untuk

tanah timbunan. Analisa LEM dilakukan dengan cara *Fellenius, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, Sarma dan Spencer*. Analisa FEM dilakukan

Tabel 5 Parameter Tanah Dasar proyek Timbunan Rio de Janeiro

Kedalaman (m)		Jenis Tanah	Parameter					
Dari	Sampai		Cu (kN/m ²)	Phi (°)	Berat Isi (kN/m ³)	Poisson Ratio, ν'	Eu (kN/m ²)	E' (kN/m ²)
0	2,5	Crust	40	0	13,2	0,35	15000	13500
2,5	5	Lempung lunak	8	0	13,2	0,3	5000	4350
5	10		12	0	13,2	0,3	5000	4350

dengan undrained A, undrained B, and Undrained B, dan undrained C.

5.1 Faktor Keamanan

Perhitungan faktor keamanan dengan menggunakan data-data diatas, metoda LEM dan FEM menghasilkan faktor keamanan seperti disajikan pada Tabel 6. Tabel 7 menyajikan selisih faktor keamanan rata-rata.

Tabel 6 Rangkuman Hasil Faktor Keamanan

Metode	Faktor Keamanan		
	Proyek Malaysia	Proyek B	Proyek Rio de Janeiro
Plaxis Undrained A	≤ 1 (Runtuh)	-	-
Plaxis Undrained B	≤ 1 (Runtuh)	1,2	1,16
Plaxis Undrained C	≤ 1 (Runtuh)	1,2	1,16
Fellenius	1,05	1,11	1,26
Bishop	1,05	1,22	1,26
Janbu	0,93	1,24	1,09
Morgenstern-Price	0,98	1,17	1,10
Spencer	0,97	1,17	1,08
Sarma	0,96	1,10	1,13

Tabel 7 Persentase Perbedaan Faktor Keamanan Rata-Rata

Proyek	FK rata-rata		% Perbedaan
	LEM	FEM	
Timbunan Malaysia	0.99	0,96	3
Proyek B	1.17	1.20	2.5
Timbunan Rio de Janeiro	1.15	1.16	0.86

5.2 Prediksi Ketinggian Runtuh

Di samping perhitungan faktor keamanan diatas, dengan menggunakan data-data tanah dasar HATTI-PIT-XVI 2012, 4-5 Dec 2012, Hotel Borobudur, Jakarta

dalam sub 4 di atas, dilakukan juga perhitungan dengan memainkan ketinggian timbunan hingga didapatkan faktor keamanan sama dengan atau mendekati angka 1. Hal ini dimaksudkan untuk mencari prediksi ketinggian timbunan dari masing-

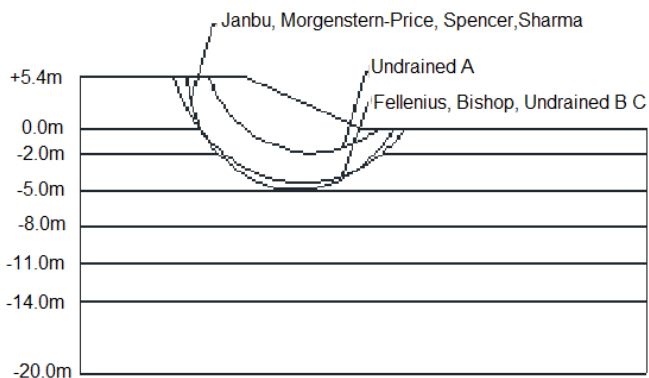
Tabel 8 Prediksi Tinggi pada saat Longsor

Metode	Prediksi tinggi keruntuhan		
	Proyek Malaysia	Proyek B	Proyek Rio de Janeiro
Plaxis Undrained A	4,4 m	-	-
Plaxis Undrained B	5,1 m	3,9 m	2,9 m
Plaxis Undrained C	5,05 m	3,9 m	2,8 m
Fellenius	5,4 m	3,9 m	3,1 m
Bishop	5,4 m	4,2 m	3,1 m
Janbu	5 m	2 m	2,6 m
Morgenstern-Price	5,2 m	2,8 m	2,7 m
Spencer	5,1 m	3,8 m	2,7 m
Sarma	5,1 m	3,8 m	2,8 m
Aktual	5,4 m	4 m	2,5m

masing metode hingga keruntuhan terjadi. Hasilnya disajikan pada Tabel 8.

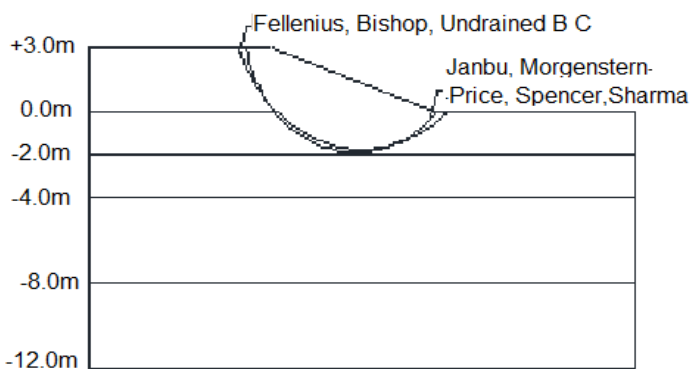
5.3 Pola Keruntuhan

Perbandingan pola keruntuhan tiap kasus yang dipakai dalam analisa LEM dan FEM disajikan dalam Gambar 5, 6 dan 7.

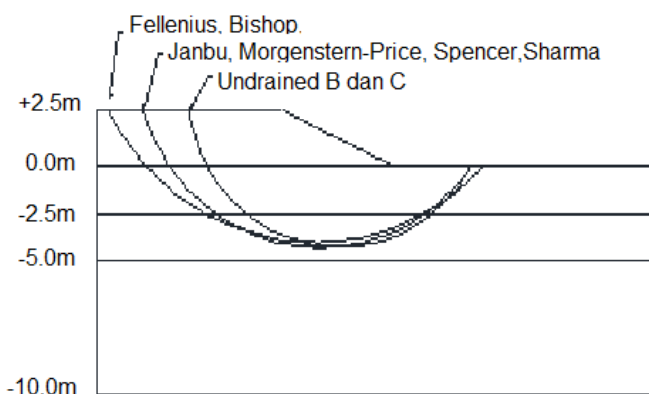


Gambar 5 Perbandingan Pola Keruntuhan Proyek Malaysia

Pola keruntuhan Proyek Timbunan di Malaysia, Gambar 5, menunjukkan bahwa Plaxis undrained A menghasilkan pola kelongsoran yang lebih dangkal. Hal ini dikarenakan parameter kuat gesernya menggunakan parameter kuat geser efektif. FEM Plaxis Undrained B dan Undrained C



Gambar 6 Perbandingan Pola Keruntuhan pada Proyek B



Gambar 7 Perbandingan Pola keruntuhan pada Percobaan Timbunan Rio de Janeiro

yang menggunakan parameter kuat geser undrained menghasilkan pola keruntuhan mirip dengan metoda LEM. Pola bidang kelongsoran pada Proyek B, FEM Plaxis Undrained B dan C memiliki kecenderungan bentuk yang dapat dikatakan sama dengan metoda LEM (Gambar 6). Pada kasus ketiga, proyek Rio de Janeiro, pada sisi lereng FEM Plaxis Undrained B dan C

menghasilkan awal bidang kelongsoran yang lebih dekat ke tepi lereng dibandingkan dengan metoda LEM. Dari dasar kelongsoran hingga sisi kanan lereng pola kelongsoran dapat dikatakan berhimpit (Gambar 7). Perbedaan dapat terjadi karena pada FEM Plaxis bidang kelongsoran dicari dari bidang lemah yang dapat terjadi (Plaxis mencari titik-titik plastis yang terjadi pada setiap elemen tanah) sedangkan pada LEM bidang kelongsoran diasumsikan diawal analisis. Catatan: Plaxis undrained A tidak dapat dilakukan pada proyek B dan proyek Rio karena tidak terdapat parameter kuat geser efektif.

6. KESIMPULAN

Dari studi perbandingan ini dapat dicatat beberapa hal sebagai berikut:

- LEM dan FEM dapat dikatakan menghasilkan faktor keamanan yang relatif sama besar, dengan selisih rata-rata kurang dari 5%.
- Dalam prediksi ketinggian keruntuhan analisa FEM Plaxis Undrained A dapat dikatakan tidak tepat. Undrained B dan C yang memasukkan nilai parameter kuat geser undrained lebih tepat.
- Prediksi ketinggian runtuh, secara umum (kecuali metoda FEM Plaxis Undrained A, cara LEM Janbu dan Morgenstern-Price pada proyek B) dapat dikatakan menghasilkan hasil yang lebih kurang sama.
- Pola kelongsoran yang dihasilkan antara kedua metode memiliki kecenderungan yang sama. Kecuali FEM Plaxis Undrained A yang tidak tepat.

Akhirnya, secara umum dapat disimpulkan bahwa baik LEM ataupun FEM dapat dipakai dalam perhitungan analisa kestabilan lereng. FEM Plaxis undrained A harus digunakan secara lebih cermat. FEM memiliki kelebihan dibanding LEM, sebab LEM hanya menghasilkan nilai faktor keamanan, sedangkan FEM juga menghasilkan perkiraan deformasi yang dapat terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Albatineh, N. (2006), Slope Stability Analysis using 2D and 3D Methods., University of Akron.Ohio:

- Arif, M., & Widodo, A. (2008), Analisa Balik Kelongsoran-Studi Kasus di Jember, Jurusan Teknik Sipil ITS, Surabaya.
- Bishop, A. W. (1955), The Use of The Slip Circle in The Stability Analysis of Slopes, *Geotechnique*, 7-17.
- Bowles, J. E. (1985), Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah 2nd ed., Erlangga, Jakarta.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, Singapore.
- Craig, R. F. (1989). *Mekanika Tanah* (4th ed.), Erlangga, Jakarta.
- Das, B. M. (1997). *Advance Soil Mechanic*, Taylor and Francis, Sacramento, USA.
- Das, B. M. (1998), *Principles of Geotechnical Engineering*, PWS PUBLISHING COMPANY, Sacramento, USA.
- K., S. S. (1973). Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique*, 429-433.
- Malaysian Highway Authority (1989), Prediction of Behaviour of a test Embankment on Malaysian Marine Clay., *Proc. International Symposium on Trial Embankment on Malaysian Marine Clay* (hal. 1-8). Kuala Lumpur:
- Morgenstern, R. N., & Price, V. E. (1965). The Analysis of The Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, 79-93.
- PLAXIS b.v (2012), *Plaxis Manual*, Plaxis BV, Netherlands.
- Romalho-Ortiago, J. A., Werncek, M. L., & Lacerda, W. A. (1983), Embankment Failure on Clay near Rio de Janeiro. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1460-1479.
- Spencer, E., (1967), A Method of Analysis of the Stability of Embankments Asuming Parallel Interslice Force. *Geotechnique*, 11-26.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1993). *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa*, 2nd ed., Vol. I., Jakarta: Erlangga.