

Strategi Baru untuk Analisis Stabilitas Lereng Batuan

On The Method Of Rock Slope Stability Analysis

Wilham George Louhenapessy^{1,a)}

¹⁾Calvin Institute of Technology

Koresponden : ^{a)}wilham.george@gmail.com

ABSTRAK

Dalam pemodelan analisis stabilitas lereng batuan, ada dua metode analisis yang banyak digunakan dalam praktek rekayasa dan riset. Keduanya adalah Metode *Limit Equilibrium* / Kesetimbangan Batas (LEM) dan Metode Elemen Hingga *Elastic Analysis* (FEM #1). Kedua metode tersebut memiliki keterbatasan dan kelemahan tersendiri dalam melakukan analisis stabilitas lereng terutama dalam idealisasi kondisi awal batuan dan prediksi faktor keamanan. Dengan berbasiskan pengalaman lapangan, penulis mengusulkan strategi / metode baru dalam analisis stabilitas lereng yang menggabungkan dua metode klasik di atas dengan metode analisis yang bergantung dengan waktu (*time dependent / creep*). Metode ini telah dikembangkan dengan implementasi perilaku viscoplastisitas untuk kode metode elemen hingga (Louhenapessy & Pande, 2000 dan Zienkiewicz & Pande, 1977). Untuk kasus disain lereng / terowongan di/dalam massa batuan, banyak situasi praktis menunjukkan deformasi yang bergantung dengan waktu, terbukti dengan adanya instrumentasi pengamatan (*observation instruments*) pada struktur lereng / terowongan batuan umumnya (Panet & Guenot 1982, Pande 1990, Aydan 1995, Panet 1996, Aydan 2016). Elasto-visko-plastisitas telah diusulkan oleh Bingham (1922), dan kemudian telah berhasil di-implementasikan pada metode elemen hingga untuk memecahkan masalah *creep* (rayapan) pada konstruksi di/dalam tanah dan batuan (Zienkiewicz-Cormeau 1974, Zienkiewicz-Pande 1977, Pande dkk. 1990, Louhenapessy 2003 dan Wittke 2014). Bagan alir (*flow chart*) analisis proses dengan contoh dan studi parametrik berdasarkan proyek juga diberikan disini. Program (*coding*) yang telah dikembangkan berdasarkan metode baru yang diusulkan sangat membantu dalam memecahkan masalah stabilitas lereng, dan selanjutnya dapat diambil rekomendasi untuk perkuatan lereng.

Kata Kunci : Metode Kesetimbangan Batas, Metode Elemen Hingga, Creep, Viscoplastisitas, Studi Parametrik, Model Multilaminasi (Zienkiewicz-Pande 1977)

PENDAHULUAN

Banyak infrastruktur jalan (Teknik Sipil), infrastruktur / gedung fasilitas tambang yang berada di bukit /lereng adalah penunjuang bagi roda perekonomian maupun kegiatan produksi tambang, demikian pula terowongan, diproyek-proyek infrastruktur, banyak terdapat dilokasi lereng dari sebuah bukit.

Seiring dengan bertambahnya waktu, struktur bangunan dan tanah / batuan disekitarnya mengalami gejala deformasi, akibat penggalian dibawah tanah dan aktivitas konstruksi ataupun pembebanan lainnya.

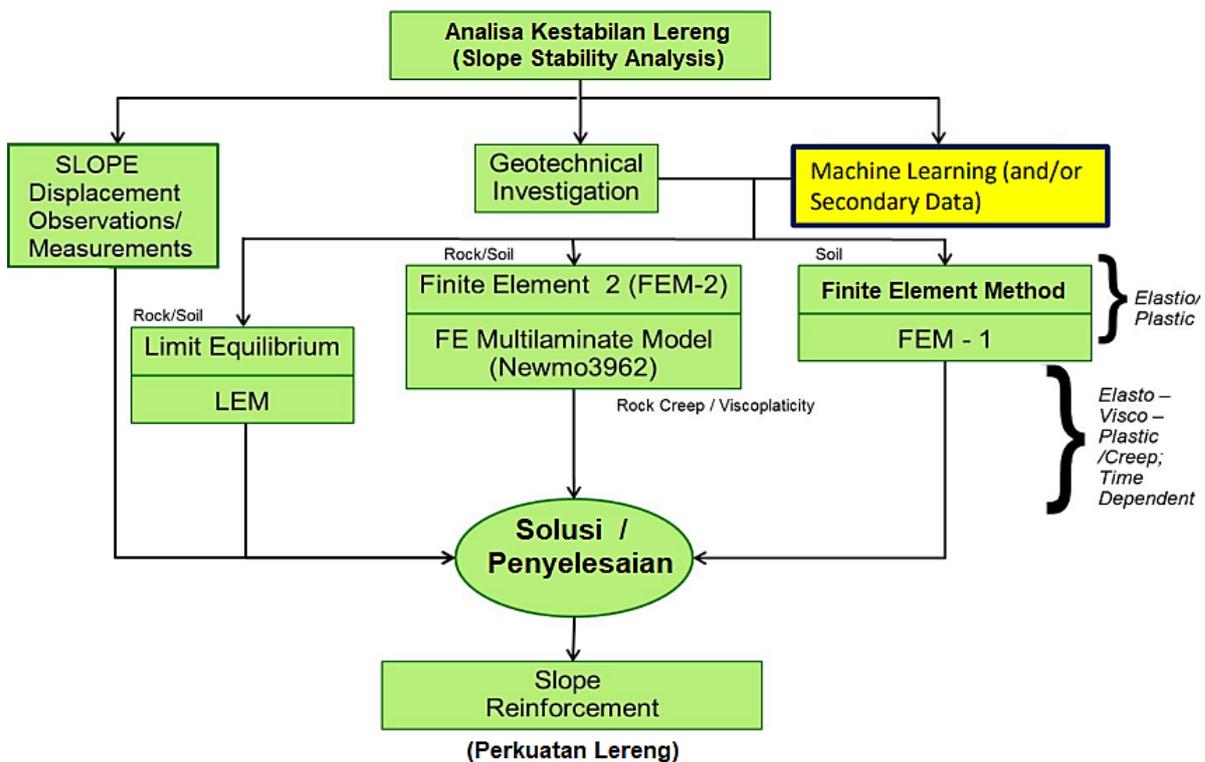
Contohnya, dari beberapa proyek tercatat sebelumnya ditunjukkan bahwa pada beberapa area dari satu fasilitas tambang/teknik sipil telah terjadi longsoran *surface failure*.

Dalam tulisan ini, kami akan menyajikan hasil penelitian, dan studi parametrik berdasarkan data sekunder dan asumsi. Selanjutnya data-data tersebut akan diolah dengan menggunakan software, sebagai berikut:

1. Metode Elemen Hingga 1 Analisa Elastis (FEM #1),
2. Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium* =LEM),
3. Metode Elemen Hingga 2 (FEM #2), dengan implementasi Model Multilaminasi (*Multilaminat Model*), dengan perangkat lunak yang digunakan adalah Newmo3962 (Louhenapessy & Pande 2000), perangkat lunak ini merupakan pembaruan dari algoritma model Multilaminasi generasi lama oleh Zienkiewicz & Pande (1977). Newmo3962 dilengkapi dengan kemampuan komputasi kriteria runtuh dan undrained, sbb.:
 - a. Keruntuhan Mohr Coloumb untuk tanah dan batuan (Pemodelan dengan FEM-1)
 - b. Keruntuhan Hoek & Brown untuk batuan (Dalam pemodelan dengan FEM-1 dan LEM)
 - c. Kriteria untuk *creep* / adalah Model Bingham, dengan analisis yang bergantung waktu (*Time Dependent*) dalam hal ini: analisis *viscoplasticity* (Zienkiewicz & Corneau 1974, Swoboda et.al. 1987, Louhenapessy 2000 dan Louhenapessy 2017)
 - d. Analisis tak terdrainase (Louhenapessy 2000).

Pemilihan Kriteria-kriteria dan metode-metode diatas, dilakukan untuk mengkaji dan mengidentifikasi permasalahan yang ada, dan untuk memperbaiki (mencari solusi) sehingga bangunan-bangunan infrastruktur di proyek-proyek jalan maupun tambang dapat dipastikan aman dan stabil dengan memberikan rekomendasi langkah penanganan dan perbaikan. Bagan penyelesaian (*Flow Chart*) permasalahan / *problem* dapat dilihat pada Gambar 1.

Teori dan persamaan di balik model Multilaminasi FEM dapat ditemukan di dipublikasi lainnya (Louhenapessy & Lareno 2022, Pande dkk. 1990 dan Zienkiewicz & Corneau 1974).



Gambar 1. Flow Chart Stabilitas Lereng dan Strategi Perkuatan (Louhenapessy, 2017).

Tabel 1. Time dependent rock behavior (Example some projects)

No	Location & Height	By (Method of Solution)	Journal / Conf. Year	Time in Years or Months or days / Length of Observation/Simulation
1	Three Gorges Shiplock Slope 100 m (Crown El +215)	Univ. Beijing: Jin Feng et.al. (DEM)	ASCE 2003	1994–1999 (6 years+monthly measurement), after 6 years, the Max. Horiz. Disp. = 8.9 cm (Field Measurements), and 9.7 cm (DEM - Numerical Model)
2	Creep Research of UPN Mining Departement in Indonesia	The UPN by Dr. Singgih Saptono (FEM and Lab.)	7th Earth Science Conf. in 2014	49.3 days (71000 minutes) - Then finally, after 6 years, the Max. Shear strain = 0.0495 (Numerical), and 0.0480 (Lab. Test).
3	Frejus Tunnel (between France and Italy)	Prof. M. Panet's Equations & Wilham G. Louhenapessy's FEM PhD Thesis	Proc 4th Int. Congr. ISRM, Montreux, 1979	70 days. After 6 years, Convergences = 18.6875 cm (In-situ measurements, Panet & Guenot 1982), and 17.1785 cm (FEA, Louhenapessy 2000)

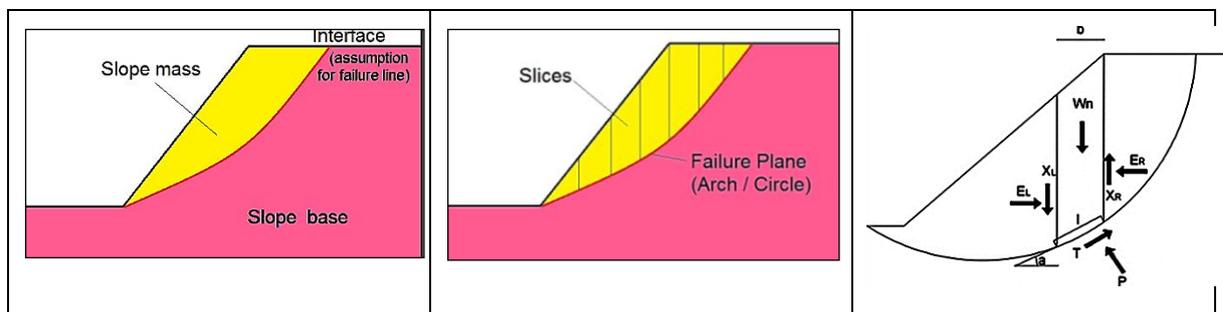
sumber :Louhenapessy 2019

METODE

Metode Kesetimbangan Batas (LEM)

Metode kesetimbangan batas / LEM adalah metode yang menggunakan prinsip kesetimbangan gaya. Metoda analisis ini pertama-tama mengasumsikan bidang kelongsoran yang dapat terjadi, bidang kelongsoran yang diasumsikan berbentuk circular dan berbentuk non-circular (Gambar 2)..

Metode kesetimbangan batas menyelidiki kesetimbangan massa tanah / batuan yang cenderung meluncur ke bawah di bawah pengaruh gravitasi. Gerakan translasi atau rotasi dipertimbangkan pada permukaan slip potensial yang diasumsikan atau diketahui di bawah massa tanah atau batuan. Semua metode ini didasarkan pada perbandingan gaya, momen, atau tegangan yang menahan gerakan massa dengan yang dapat menyebabkan gerakan tidak stabil (gaya pengganggu). Keluaran analisis adalah faktor keamanan, yang didefinisikan sebagai rasio kekuatan geser terhadap tegangan geser yang diperlukan untuk keseimbangan. Jika nilai Faktor Keamanan Statis kurang dari 1,5 maka lereng tersebut tidak stabil (SNI 8460:2017).



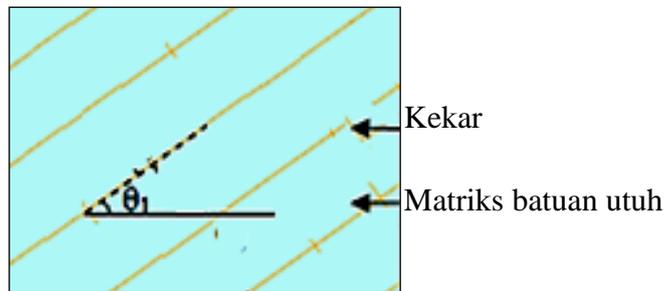
Gambar 2. Penampang melintang khas lereng yang digunakan dalam analisis dua dimensi dan Gaya pada Bidang Irisan

Model massa batuan berkekar (Jointed Rock Mass)

Massa batuan berkekar (jointed rock mass) disini diasumsikan terdiri dari batuan intact (tuh) yang menjadi terganggu dengan kehadiran bidang-bidang lemah (kekar/joint rock). Properties dari Kekar ialah, antara lain: adanya jarak antar kekar, atau *joint spacing*; *strike*

dan *dip angle* (arah kekar / *orientation of joints*); kekasaran dll. Arah kekar contohnya dalam gambar berikut ini, dimana terdapat konfigurasi dengan satu set kekar/joints-set (Gambar 3)..

Permukaan bumi (Gambar tidak berskala)



Gambar 3. Satu set kekar dengan sudut *dip* = θ_1

Keruntuhan Batuan Berkekar: Mohr-Coulomb dan Generalized Hoek-Brown

Kriteria keruntuhan batuan berkekar adalah menggunakan

1. Model Konstitutif Mohr-Coulomb. Persamaannya adalah;

$$\tau_j = C_j + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

dimana, ϕ dan C_j adalah sudut gesek dan kohesi dari joint rock, τ_j = tegangan geser pada permukaan bidang kekar, dan σ_j = tegangan normal pada permukaan bidang kekar. (Sumber : Zienkiewicz-Pande 1977)

2. Model Konstitutif untuk Generalized Hoek-Brown (Hoek, 2002). Persamaannya adalah

$$\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_{ci} [m_b (\sigma_3 / \sigma_{ci}) + s]^a = 0 \quad (2)$$

dimana σ_1 dan σ_3 = tegangan utama, σ_{ci} kuat tekan batuan utuh. Kemudian,

$$m_b = m_i \exp ((GSI-100)/(28-14D)) \quad (3)$$

$$s = \exp ((GSI-100)/(9-3D)) \quad (4)$$

$$a = 0.5 + 0.166667 [\exp (GSI/15) - \exp (-20/3)] \quad (5)$$

m_i = adalah nilai konstanta Hoek-Brown m untuk batuan utuh, m_b adalah nilai konstanta Hoek-Brown m untuk massa batuan, s dan a adalah konstanta yang bergantung pada karakteristik massa batuan dan c_i adalah kuat tekan uniaksial dari potongan batuan utuh. GSI adalah nilai Geological Strength Index untuk massa batuan, dan D adalah faktor gangguan.

(Sumber : Hoek 1995)

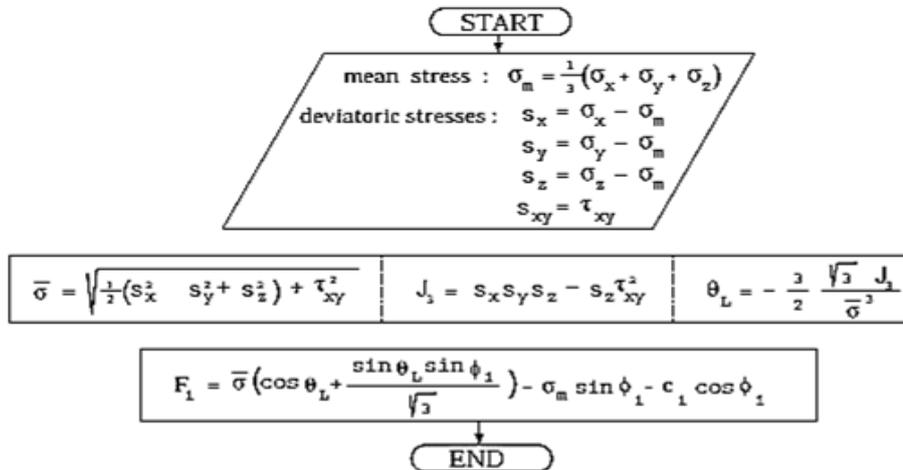
Keruntuhan Batuan Utuh (Intact Rock Failure)

Penggunaan model Konstitutif Mohr-Coulomb untuk batuan utuh, dengan persamaan sebagai berikut,

$$\tau_i = \sigma_{ni} \tan \phi_o + C_o \quad (6)$$

(Sumber : Hoek 1995)

di mana σ_{ni} adalah tegangan normal pada bidang runtuh dan ϕ_o dan C_o adalah konstanta material untuk batuan utuh. Gambar 4 melukiskan Diagram Perhitungan Keruntuhan *Mohr Coulomb Intact Rock*. (batuan utuh).



Gambar 4. Diagram Alir /Algoritma untuk keruntuhan batuan utuh

Kerangka umum untuk model konstitutif untuk massa batuan berkekar (*Joint Rock Mass*)

Kerangka multilaminasi (*multilaminate model*) yang dipakai untuk mengembangkan model konstitutif massa batuan berkekar telah dibahas secara rinci dalam berbagai publikasi (Zienkiewicz dan Pande, 1977; Pande et.al., 1990; Louhenapessy 2003 dan Louhenapessy 2017). Konstanta elastik dari massa batuan dan massa batuan berkekar dapat ditentukan dari percobaan *in-situ* / uji triaksial skala besar (Natau et.al. 1995).

Pendekatan alternatif adalah untuk memperoleh matriks elastisitas massa batuan berkekar dari sifat konstitutif konstituennya. Filosofinya adalah memperlakukan massa batuan berkekar tsb. sebagai material komposit dengan batuan utuh (*intact rock*) dan kekarnya (*joint rock*) sebagai penyusunnya. Hal ini untuk mencari kekakuan normal (*normal stiffness*) dan kekakuan geser (*shear stiffness*) dari massa batuan berkekar. Sehingga, Matriks elastisitas massa batuan, D_e^{RM} , menjadi,

$$D_e^{RM} = \left[\sum_{i=1}^n \mathbf{TC}_L^{\text{JOINT}} \mathbf{T}^i + [D_e^{\text{INTACT}}]^{-1} \right]^{-1} \quad (7)$$

dimana "n" adalah jumlah set dari kekar, \mathbf{T} adalah matriks transformasi, \mathbf{C} adalah matriks *compliance* yang didalamnya terdapat data kekakuan kekar dan D_e^{INTACT} adalah matriks elastisitas konvensional dari batuan utuh (Pande dkk., 1990)

RAYAPAN (CREEP): PENGARUH WAKTU DALAM MASSA BATUAN.

Pendahuluan

Telah diketahui dengan baik bahwa batuan memiliki sifat mulur/viskoelastisitas/viskoplastisitas yang merupakan perilaku tergantung waktu selama deformasi (Zienkiewicz dan Corneau, 1974, Panet dan Guenot 1982, dll.). Perbedaan utama antara model rayapan dan model konstitutif lainnya adalah konsep waktu dalam pemodelan / simulasi numerik.

Perilaku bergantung waktu dari massa batuan telah dipelajari secara rinci oleh banyak penulis sebagai berikut:

1. untuk struktur geoteknik bawah tanah, oleh (penulis/ tahun terbit): Cristescu et al., 1987; Barla dkk., 2008; Zienkiewicz & Corneau, 1974; Panet & Guenot, 1982; Cristescu & Hunsche, 1998; Aydan dkk., 1995; Kovari 1998, Louhenapessy 2003; Rai, Kramadibrata & Wattimena 2015.
2. untuk lereng, oleh (penulis/ tahun terbit): Kodama dkk., 2008; Feng dkk., 2003; Bozzano dkk., 2012; Apuani dkk., 2007; Rai, Kramadibrata dan Wattimena, 2015; Aydan, 2016.

Banyak situasi praktis dalam massa batuan menunjukkan bahwa perpindahan bergantung pada waktu, dan ada instrumentasi untuk pengamatan struktur terowongan atau lereng batuan berdasarkan asumsi perilaku yang bergantung waktu ini (Panet dan Guenot, 1982; Pande et.al., 1990. ; Aydan dkk., 1995; Panet, 1996).

Dalam proses rayapan / *creep*, pemodelan *Time Step* (Langkah-Waktu) adalah suatu jumlah Langkah *artificial* yang digunakan untuk bergerak maju kedalam kondisi yang stabil (*steady state*) didalam suatu *Looping do-loop*" dalam kode/pemrograman komputer, Zienkiewicz & Corneau 1977) dan dapat dikalibrasi / di-*setting* menjadi waktu yang sebenarnya - *real time* - dengan menggunakan data-data rayapan / *creep* dari laboratorium (Rai , Kramadibrata & Wattimena 2015; Aydan 2016).

Korelasi untuk Elasto-Visco-Plastik dan kriteria kegagalan dan penerapannya

Versi awal elasto-visko-plastisitas diusulkan oleh Bingham (1922), yang sejak itu telah berhasil digunakan dalam hubungannya dengan elemen hingga untuk memecahkan masalah mekanika tanah dan mekanika batuan (Zienkiewicz dan Pande, 1977; Pande, 1990; Wittke, 2014). Gambar 5 menunjukkan bahan elasto-viskoplastik teoritis dasar, di mana tensor regangan total dapat dibagi menjadi dua bagian,

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{vp} \quad (8)$$

dimana ε^e = regangan elastis; dan ε^{vp} = regangan visko-plastik. Regangan diwakili oleh vektor enam kuantitas dalam kasus tiga dimensi dan dilambangkan dengan komponen berikut:

$$\varepsilon^T = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}] \quad (9)$$

Hubungan tegangan-regangan untuk bahan elastis linier dapat didefinisikan sebagai:

$$\varepsilon^e = C^{em} \sigma \quad (10)$$

di mana σ = tegangan tensor, dan C^{em} = Matriks *Compliance* massa batuan. Kondisi hasil yang diberikan oleh,

$$F(\sigma, \kappa) - y(\kappa) = 0 \quad (11)$$

di mana, $F < 0$, adalah kondisi elastis murni, y menghasilkan tegangan dan κ adalah riwayat pengerasan (atau pelunakan) parameter. Untuk menentukan hubungan antara komponen regangan, potensial plastis didefinisikan sebagai,

$$Q(\sigma) = 0 \quad (12)$$

$$\text{Sehingga, } \frac{d\varepsilon^{vp}}{dt} \equiv \dot{\varepsilon}^{vp} = \gamma < \Phi \left(\frac{F}{F_0} \right) > \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (13)$$

dimana, F_0 = nilai referensi untuk membuat F/F_0 menjadi non dimensional. Simbol $\gamma = \text{fluidity parameter}^1$. Fungsi $\Phi \left(\frac{F}{F_0} \right)$ atau $\Phi(F)$. menunjukkan sebuah fungsi monotonik dari fungsi keruntuhan / *yield F* atau $\Phi \left(\frac{F}{F_0} \right)$.

Notasi $< . >$ menyiratkan arti sbb.,

$$< \Phi \left(\frac{F}{F_0} \right) > = \Phi \left(\frac{F}{F_0} \right) \text{ untuk } F > F_0$$

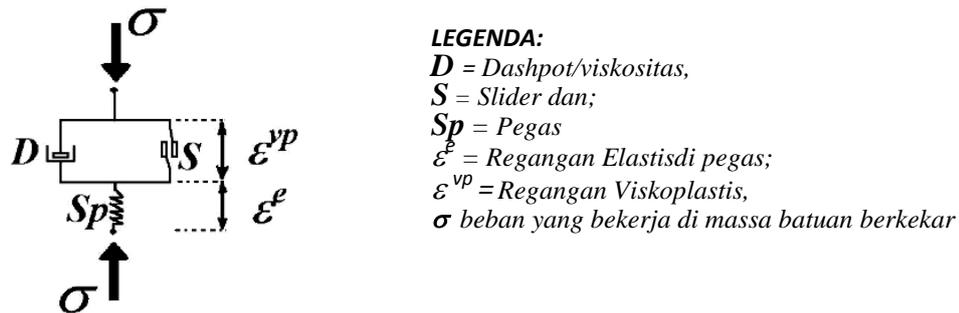
$$= 0 \text{ untuk } F \leq F_0$$

Fluidity Parameter adalah parameter fluiditas, yaitu sebuah nilai konstan yang memiliki satuan 1/waktu (1/ viskositas).

CONTOH STUDI PARAMETRI ANALISIS STABILITAS LERENG (LEM DAN FEM: Penerapan pada NEWMO3962)

Kemajuan terbaru dalam metode komputasi numerik, Elemen Hingga atau lainnya, dimungkinkan prediksi evolusi ketergantungan waktu di struktur bawah tanah (atau di lereng / peristiwa longsor) jika diketahui dengan tepat / presisi hukum reologi bahan tanah/batuan.

Akan digunakan model rayapan batuan dengan Model Bingham dan data akan disediakan oleh referensi laboratorium dengan parameter Viskositas² η atau etha (Rai, Kramadibrata & Wattimena, 2015).

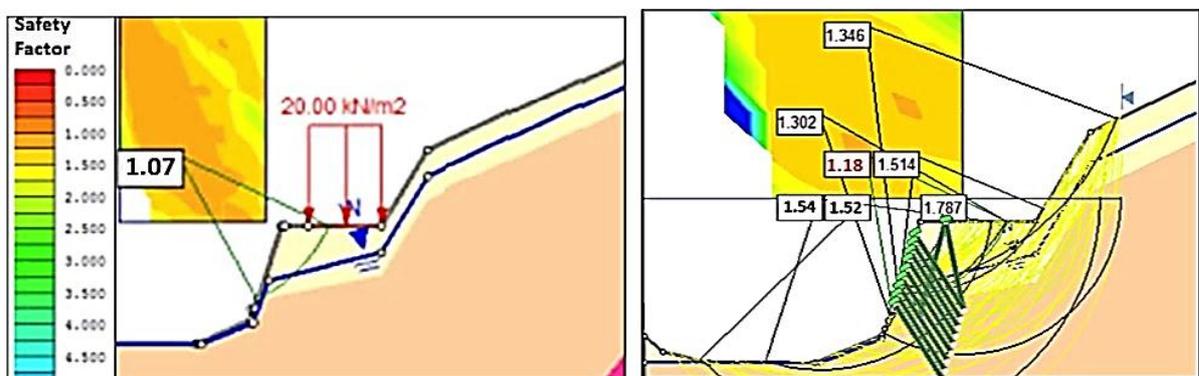


Gambar 5. Analogi Rheologi Elasto-viskoplastik (Model Bingham)

PARAMETERIK STUDY #1 (Infrastruktur dan Tambang)

Batuan penyusun lereng diasumsikan adalah batuan sedimen vulkanik dan batuan beku. Batuan sedimen vulkanik terdiri dari tuf dan breccia tuff, sedangkan batuan beku tersusun oleh Andesit. Sementara itu, struktur geologi secara umum diasumsikan berarah dominan NW-SE dan NE-SW. Dan asumsi massa batuan yang diperoleh dari literatur berdasarkan klasifikasi Bieniawski (1989) terdiri dari massa batuan kelas II (batuan baik) sampai kelas V (batuan sangat buruk).

Hasil dari keseimbangan batas (LEM) ditunjukkan pada Gambar 6 dan Tabel 2. Hasil pemodelan dari 6 run di area Lokasi 1 semuanya menunjukkan nilai SF lebih rendah dari nilai persyaratan SF dari SNI 8460:2017 (2017), dan nilai SF sangat dipengaruhi oleh air tanah, tetapi ada tidaknya beban bangunan tidak terlalu berpengaruh. Pada kasus gempa, beban gempa akan sangat mempengaruhi Faktor Keamanan yang dibutuhkan (Gempa dengan PGA = 0,275 g). Oleh karena itu, SF diperoleh dari arah bolak-balik jika terjadi gempa.



Gambar 6. a) Hasil LEM untuk Model TR3, b) Hasil LEM untuk perkuatan lereng

Dari nilai η , didapat nilai parameter fluiditas, $\gamma = 0.0000105435415$, dengan dimensi 1/(kPa hari)

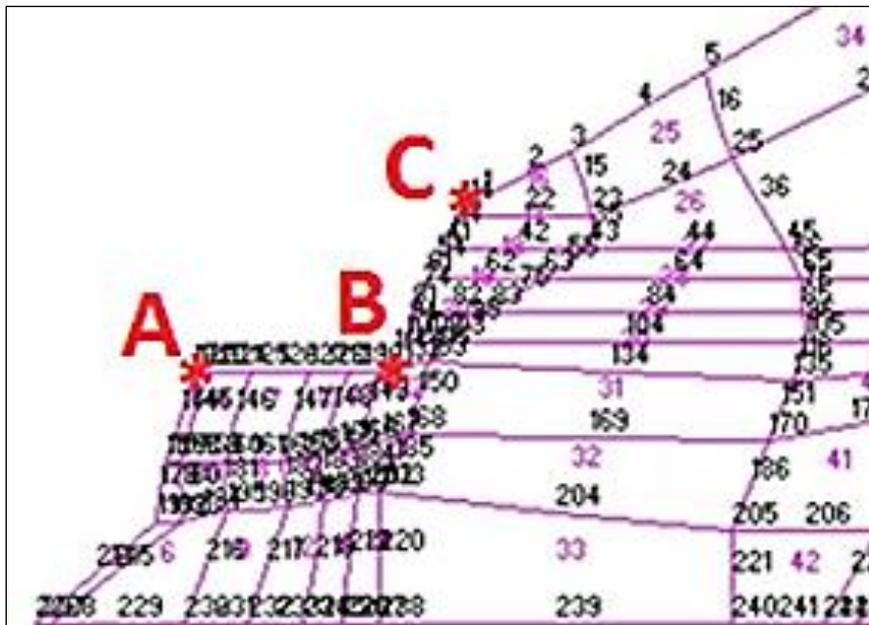
1. Contoh 1

Kombinasi beban gempa dengan ketinggian air 10 m di bawah permukaan tanah, SF Bishop = 0,79. Beberapa hasil desain Slope Reinforcement tercantum pada Tabel 2. Solusinya adalah dengan Micropile, shotcrete dan *Anchor*.

Tabel 2. Ringkasan Studi Parametrik Analisis Stabilitas Lereng oleh LEM

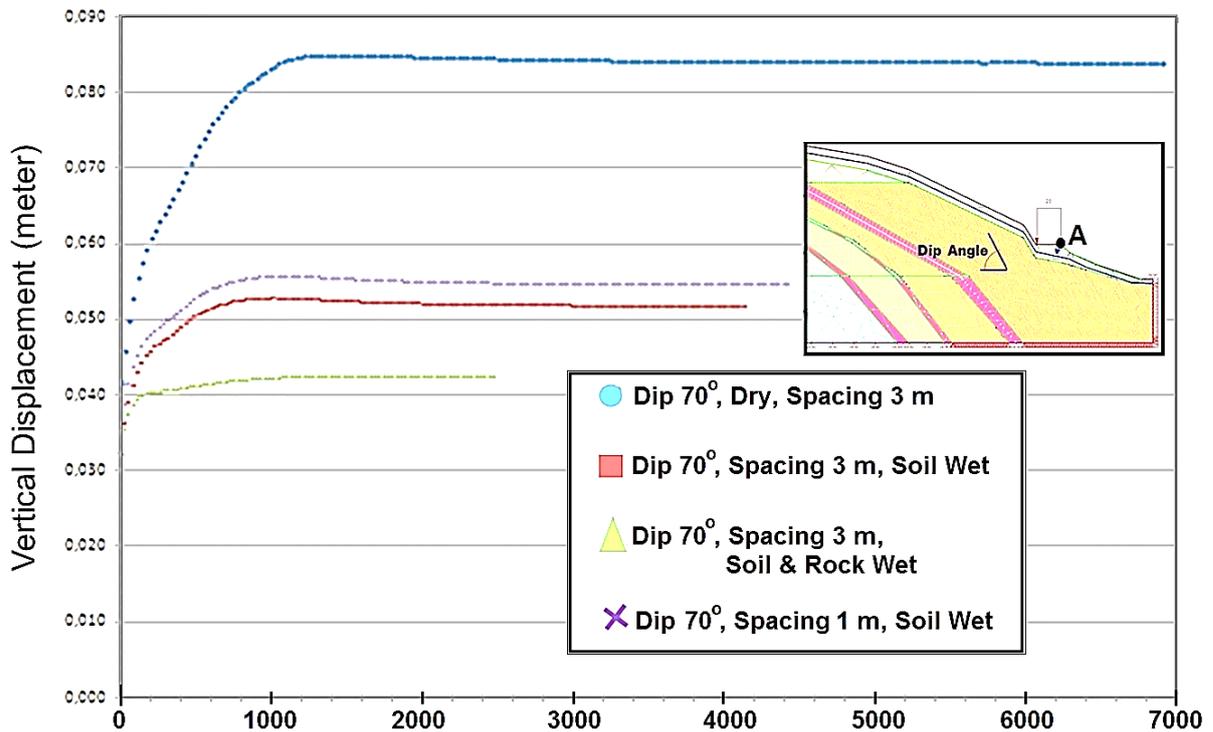
No	Lokasi	10 m	0 m	Gempa 0.2..g	Beban	Felinus	Bishop Modified	Spencer	Morgenstein-	SF Required*
T1a	1	√	-	-	-	1.09	1.06	1.15	1.12	<1.5
T2	1	√	-	-	-	0.81	0.79	0.79	0.76	<1.3
T3	1	√	-	√	√	1.07	1.04	1.12	1.08	<1.3
T4	1	√	-	√	√	0.79	.78	0.78	0.75	<1.3
T4a	1	-	√	√	-	.71	.62	0.63	0.63	<1.3

NB: √ = Ya (Ada); 10 MAT = level air tanah 10 m dibawah permukaan *ground*
(Sumber : Louhenapessy 2017) – SF Required³



Gambar 7. Jaring-jaring Metode Elemen Hingga: Penomoran Elemen dan Nodal – Lokasi 1, dengan Titik-titik A, B & C (dgn ketinggian lereng diatas 100 m)
(Sumber : Louhenapessy 2017)

SF Required = Syarat minimum faktor keamanan berbasiskan Peraturan Dept. PUPR dalam SNI 2017, yaitu 1.3 (untuk Beban Gempa) dan 1.5 (untuk beban static)



Gambar 8. Perpindahan Vertical di titik A. vs Waktu, dengan *FEM Multilaminat* Run # MM-3,4 & MM-11,13 (Dip 70°) - (Sumber : Louhenapessy 2017)

Analisis dan Hasil dari Model Multilaminasi FE - Lokasi di #1

Model Elemen Hingga (FE) Multilaminasi akan menggunakan kriteria keruntuhan batuan bersama Mohr Coulomb dan viscoplastisitas (*creep*). FE Mesh digambarkan pada Gambar 7. Elemen Mesh terdiri dari 248 nodal dan 69 Elemen Isoparametrik. Tiga titik yang akan dipilih dari model ini adalah Nodal Point nomor 121 (di A) dan Nodal nomor 131 (di B) dan Nodal Point Number 1 (di C). Hasil FE Multilaminasi dapat dilihat pada Tabel 4 dan grafik ketergantungan waktu (Gambar 8).

Pada Tabel 4, kita dapat melihat perkiraan waktu keruntuhan minimum (*creep* sekunder) dalam sehari, dan perpindahan vertikal minimum di Titik A. Terlihat bahwa perpindahan vertikal bergantung dengan kejenuhan air/tekanan pori di lapisan *ground* (basah / *wet*). Demikian pula pengaruh sudut orientasi kekar (*dip angle*) dengan perbandingan data perpindahan vertikal pengamatan di Lokasi 1. Dari hasil Tabel tsb., maka yang paling mendekati kondisi *dip angle* 50° dengan kondisi basah / *wet*. Sehingga lama waktu runtuh dapat diperkirakan, yaitu: 1380 hari (Lihat ML-8 pada Tabel 4). Perlu dicatat bahwa dalam hal ini Parameter Fluiditas, $\gamma = 0.0000105435415$, dimensinya adalah $m^2 / (kPa \cdot \text{hari})$ – Angkanya didasarkan pada $1 / \eta$.

Tabel 3. Studi Parametrik dengan Analisa Kestabilan Lereng dan Perkuatan Lereng (Slope Reinforcement) dengan metode kesetimbangan batas (LEM)

Lokasi	Di lereng di	Di lereng di	Bishop Modified	Spencer	Morgenst	Dibandin
	atas A	bawah A				
1	MP	Anchor	1,33	-	-	> 1,3
1	MP	Anchor per 4.7 m	-	1,25	1,25	< 1,3
1	-	Anchor per 15.0 m	1,1	-	-	< 1,3
1	-	Anchor per 5.0 m	1,22	-	-	< 1,3
1	MP per 3.5 m	-	1,22	-	-	< 1,3
1	MP per 3.5 m	-	-	1,8	-	> 1,5
1	MP per 3.5 m	Anchor	1,1	-	-	< 1,3

(Sumber : Louhenapessy 2017)

Tabel 4. Studi Parametrik dengan Analisa Elemen Hingga Multilaminat Model untuk Creep / Rayapan / Viscoplasstisitas

Elemen Hingga Run#	Kondisi Ground	Kekuatan Tarik (Mpa)	Sudut Dip (Dip angle)	Jarak antar kekar (m)	Waktu runtuh (Prediksi dalam hari)	Jumlah Langkah (Time-Step) sampai runtuh	Perpindahan di A (cm)	Observasi lapangan (cm)
MM-1	Dry	2.6	60	3	3597	1236	8.3	Divalidasi dengan pengukuran di lapangan / observasi
MM-2	Wet	2.6	60	3	2569	883	5.5	
MM-3	Dry	2.6	70	3	7097	2438	8.4	
ML-4	Wet	2.6	70	3	4124	1417	5.2	
ML-5	Dry	2.6	89	3	1462	503	3.7	
ML-6	Wet	2.6	89	3	1240.6	427	2.9	
ML-7	Dry	2.6	50	3	1529	526	6.1	
ML-8	Wet	2.6	50	3	1380	475	4.4	
ML-9	Dry	0.8	70	3	4019	1381	7.4	
MM-10	Wet	0.8	70	3	4872	1674	4.9	
MM-11	Wet	2.6	70	3	4400	1512	5.5	
MM-12	Wet.F	2.6	70	3	2484.2	854	4.3	

NB: √ = Ya (Ada); MP= Micro Pile; EA= End Anchor, BP=Borepile

sumber :Louhenapessy 2017

KESIMPULAN dan REKOMENDASI

Dalam laporan ini, telah ditunjukkan analisa enjinereng (*engineering analysis*) dengan Metode Kesetimbangan Batas / *Limit Equilibrium Method* (LEM) dan Metode Elemen Hingga / *Finite Element Method* (FEM), *Multi Laminat Model* dan Pemodelan *Creep* / Rayapan (Viscoplasticity dan Rheology of Rock) serta, model konstitutive untuk keruntuhan massa batuan (*intact & joint rock*), yaitu Mohr-Coulomb dan Hoek-Brown.

Pada simulasi numerik menggunakan Limit Equilibrium Method (LEM), untuk Safety Factor (SF), telah dibandingkan dari empat metode, antara lain Fellenius, Bishop Modified, Spencer dan Morgenstern - semua SF berada di bawah angka yang dipersyaratkan, yaitu 0,63 (TR4a, Tabel 2)

Pemodelan LEM dengan penambahan perkuatan lereng : Hasil yang baik hanya pada skala micropile (9 setiap 5m, dan 1,5 out of plane). Oleh karena itu, meskipun SF dinaikkan menjadi 1,22, namun jumlah tersebut masih di bawah jumlah yang dibutuhkan, sedangkan digunakan End Anchor lain (dengan kapasitas 800 kN, 8 buah per 4 m dan 3m out of plane). Hasil SF Bishop number diatas 1.3. (Lihat 4 baris pertama dari Tabel 3).

Untuk kondisi gempa dengan PGA 0,275 g, dan dengan tulangan lereng (Anchor), akan diperoleh perpindahan vertikal antara 12,1 cm sampai 15,2 cm. Tetapi jika tidak terjadi gempa maka perpindahan vertikal minimum adalah 1,14 cm -s/d 2,7 cm, tergantung pada sudut kemiringan masing-masing, dan tekanan air tanah di dalam massa batuan berkekar. Pemodelan Studi FEM Parametrik juga dilakukan dengan perkuatan lereng (Anchor, Borepile, Shotcrete dan high-tensile-steel-mesh).

Dalam laporan ini, telah ditunjukkan juga sifat batuan berkekar dengan jangka waktu yang relatif lebih Panjang/lama, pemodelan berdasarkan sifat rayapan batuan / *Time Dependent / creep*, yaitu Model Bingham, disertai dengan data Fluidity Parameter (Viscosity) dari Laboratorium.

Simulasi Studi Parametrik menunjukkan bahwa pemodelan numerik yang bergantung pada waktu (Multilaminat Model / elasto-viskoplastik) berguna sebagai prediksi berapa lama akan terjadi keruntuhan.

Perpindahan vertikal bergantung dengan kejenuhan air/tekanan pori di lapisan *ground* (basah / *wet*). Demikian pula pengaruh sudut orientasi kekar (*dip angle*) dengan perbandingan data pengamatan (observasi) perpindahan vertikal di Lokasi 1. Dari hasil Tabel tsb., maka yang paling mendekati kondisi *dip angle* 50° dengan kondisi basah / *wet*. Sehingga lama waktu runtuh dapat diperkirakan, yaitu: 1380 hari (ML-8 pada Tabel 4). Sebelumnya sudah diketahui parameter fluiditasnya dari data Lab.

CATATAN. Penulis mengucapkan terima kasih atas kesempatan yang diberikan untuk mempresentasikan paper ini di acara SEMAIF 2022. Kiranya paper ini dapat berguna bagi disain infrastruktur di masa datang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aydan, O. (2016). *Time-Dependency in Rock Mechanics and Rock Engineering*, ISRM Book Series, CRC Press, ISBN 9781138028630
- [2] Aydan, O., Ito, J., Akagi, T., Ito, T., & Sato, J. (1995). "Prediction of deformation behaviour of a tunnel in squeezing rock with time-dependent characteristic". Pages 463-469 of: Pande, G.N., & Pietruszczak, S. (eds), *NUMOG V, Davos, Switzerland. 5th Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics*. A.A. Balkema.
- [3] Aydan, O. (2017). *Time-Dependency in Rock Mechanics and Rock Engineering*. CRC Press
- [4] Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. Wiley. New York.
- [5] Bingham, E.C. (1922). *Fluidity and Plasticity*, 1st Ed. McGraw-Hill. New York:
- [6] Cristescu, N.D. dan Hunsche, U. (1997). *Time Effects in Rock Mechanics*. Wiley

- [7] De Caro, M., Crosta, G. B., Castellanza, R., Agliardi, F., Volpi, G., & Alberti, S.; (2016). “2D modelling of rockslide displacements by non-linear time dependent relationships”. In *Landslides and engineered slopes. Experience, theory and practice. Proceedings of the 12th international symposium on landslides* (Napoli, Italy, 12-19 June 2016). <https://doi.org/10.1201/b21520-89> CRC Press.
- [8] Feng, J; Chuhan, Z; Gang, W; and Wang Guanglun (2003) “Creep Modeling in Excavation Analysis of a High Rock Slope”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering / Volume 129 Issue 9 - September 2003*. American Soc. Civil Engineers.
- [9] Flum, D. ; Salzmann, H. dan Züger, M. (2005). Replacement of a failed shotcrete facing by a flexible slope stabilisation system. Polish Geological Institute Special Papers. Vol. 20 | 40-45.
- [10] Hoek, E., Carranza-Torres, C. And B. Corkum. (2002). “Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition.” *Proc. NARMS-TAC Conference*, Toronto, 2002, 1, 267-273
- [11] Kovari K., 1998, “Tunnelbau in druckhaftem Gebirge - Tunnelling in squeezing rock”. *Tunnel* 5, pp. 12-31.
- [12] Louhenapessy, W.G. (2003). “Finite Element Method (FEM) in rock tunnel engineering: Introduction to a New Method of Tunnel Support Design”. *Prosiding Konperensi Geoteknik Indonesia VI*, August 2003, HATTI.
- [13] Louhenapessy, W. G. dan Pande, G.N. (2000). *Newmo3962_2000: User's Instruction Manual*. Internal Report No.CR / 1022/ 00. Dept. of Civil Engineering, Univ. of Wales Swansea.
- [14] Louhenapessy, W. G. (2017). “Strategi Baru dalam Analisa Kestabilan Lereng”; *Temu Profesi Tahunan (TPT) XXVI PERHAPI* (Perhimpunan Ahli Tambang Indonesia) Tahun 2017 –Tanggal: 16 -18 Oktober 2017, in Balikpapan, Kalimantan Timur, Indonesia.
- [15] Louhenapessy, W. G., & Lareno, B. (2022). “Analyzing The Effect of Water Seepage and Scour on Slope Stability using Fnite Element Method”. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(2), 216-229.
- [16] Pande, G.N. & Williams, J.R. 1990. *Numerical Methods in Rock Mechanics*. Chichester: John Wiley.
- [17] Panet, M. (1996). “Two case-histories of tunnels through squeezing rocks”. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 29 (3), 155-164.
- [18] Panet, M., & Guenot, A. (1982). “Analysis of convergence behind the face of a tunnel”. Pages 197—204 of: *Tunnelling* 82. A.A. Balkema.
- [19] Rai, Made A., Kramadibrata, S. dan Ridho K. Wattimena. (2015). *Mekanika Batuan - Lab. Geomekanika dan Peralatan Tambang – ITB*. Penerbit ITB Bandung.
- [20] Saptono, Singgih (2014) “Penentuan kekuatan geser jangka panjang batupasir dengan pendekatan perilaku rayapan geser visko-elastik” – *Prosiding SEMINAR KEBUMIHAN ke- 7*, Jurusan Geologi, UGM.
- [21] SNI 8460:2017 (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik*, ICS 91.010.01-Badan Standardisasi Nasional.
- [22] Wittke, W. 2014. *Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*. New York: John Wiley. 900 halaman.
- [23] Zienkiewicz, O.C., & Corneau, I.C. (1974). “Visco-plasticity - Plasticity and Creep in Elastic Solids - A Unified Numerical Sollution Approach”. *Int. J. for Numerical Meth. in Engineering*, 8, 821-845.
- [24] Zienkiewicz, O.C., & Pande, G.N. (1977). “Time dependent multi-laminate model of rocks - a numerical study of deformation and failure of rock masses”. *Int. J. Numerical and Analytical Meth. in Geomech.* 219-247.