

ANALISIS STABILITAS LERENG DAN PENANGGULANGAN KELONGSORAN DENGAN METODE KESEIMBANGAN BATAS DAN METODE ELEMEN HINGGA

Zakaria^a

^a Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan,
Indonesia

* Corresponding E-mail : zakaria.21115057@student.itera.ac.id

Abstract : The issue of slope stability is one of the problems that often occurs due to construction work in mining or civil processes. The analysis methods and computer programs used in the stability analysis start from the Limit Equilibrium method to the Finite Element. The element method to provide great potential for overcoming geotechnical problems because of its ability to model nonlinear security policies. Land is very complex, so it is in accordance with linear habits which are not suitable for overcoming problems with geotechnics. Limit Equilibrium method is a method used in the analysis of slope stability for landslide and rotational slip type landslides. The Fellenius method, the Bishop method and the Spencer method are boundary equilibrium methods which are often used in determining the number of safety factors.

Therefore, this research was conducted to study the calculation algorithm with the Limit Equilibrium Method (LEM) by Bishop & Fellenius and also the Finite Element Method (FEM) method with a computational program producing a number of safety factors. The soil Nailing is the most economical technique for retaining slope walls because the system works quickly and does not require a large space. Implementation of soil nails is enough to use portable equipment that is easily moved and modified according to the needs and field conditions that are adjusted to the slope of the ground wall.

Based on the results of the analysis, the value of the average increase in the safety value of the slope of the nail $i = 0^\circ$ with the Plaxis program $\pm 24,961\%$ while the slide program $\pm 29,506\%$, on the slope of the nail $i = 10^\circ$ with the Plaxis program $\pm 30,943\%$ while the slide program $\pm 32,996\%$, on the slope of the nails $i = 15^\circ$ with the Plaxis program $\pm 36.304\%$ while the slide program $\pm 32.948\%$, on the slope of the nails $i = 20^\circ$ with the Plaxis program $\pm 37.808\%$ while the slide program $\pm 32.948\%$.

Keywords : Slope stability analysis, prevention of landslide, finite element method, limit equilibrium method, PLAXIS, ROCKSCIENCE SLIDE.

Abstrak : Persoalan kestabilan lereng merupakan salah satu persoalan yang sering dihadapi pekerjaan konstruksi dalam pertambangan maupun rekayasa sipil. Pada saat ini terdapat sejumlah metode analisis dan program komputer yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng mulai dari metode Keseimbangan Batas sampai dengan Elemen Hingga. Metode elemen hingga memberikan potensi besar untuk menangani permasalahan geoteknik karena kemampuannya untuk memodelkan perilaku ketegangan nonlinear tanah. Tanah yang sangat kompleks, sehingga perilaku elastis linear biasanya tidak cukup untuk menangkap perilaku masalah geoteknik. Metode keseimbangan batas adalah metode yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng untuk longsor tipe gelinciran rotasional dan translasional. Metode Fellenius, metode Bishop dan metode Spencer adalah metode kesetimbangan batas yang sering dijadikan pertimbangan dalam menentukan angka faktor keamanan.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui algoritma perhitungan dengan metode keseimbangan batas (LEM) dengan cara Bishop & Fellenius dan juga metode Elemen Hingga (FEM) dengan program komputasi hingga didapatkan angka faktor keamanan. *Soil nailing* termasuk teknik untuk stabilitas lereng dinding penahan tanah yang paling ekonomis karena sistem pekerjaan yang cepat dan tidak membutuhkan tempat yang luas. Pelaksanaan *soil nailing* cukup menggunakan peralatan *portable* yang mudah dipindah dan diubah sesuai kebutuhan dan kondisi lapangan yang disesuaikan dengan sudut kemiringan dinding tanah.

Berdasarkan hasil analisis, nilai kenaikan rata-rata angka keamanan lereng dari kemiringan nail $i=0^\circ$ dengan program Plaxis $\pm 24.961\%$ sedangkan program slide $\pm 29.506\%$, pada kemiringan nail $i=10^\circ$ dengan program Plaxis $\pm 30.943\%$ sedangkan program slide $\pm 32.996\%$, pada kemiringan nail $i=15^\circ$ dengan program Plaxis $\pm 36.304\%$ sedangkan program slide $\pm 32.948\%$, pada kemiringan nail $i=20^\circ$ dengan program Plaxis $\pm 37.808\%$ sedangkan program slide $\pm 32.948\%$.

Kata Kunci : Analisis stabilitas lereng, penanggulangan kelongsoran, metode elmen hingga, metode keseimbangan batas, PLAXIS, ROCKSCIENCE SLIDE.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Persoalan kestabilan lereng merupakan salah satu persoalan yang sering dihadapi pekerjaan konstruksi dalam pertambangan maupun rekayasa sipil. Pada saat ini terdapat sejumlah metode analisis dan program komputer yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng mulai dari metode Keseimbangan Batas sampai dengan Elemen Hingga.

Metode elemen hingga pertama kali diperkenalkan ke dalam ilmu geoteknik oleh (*Clough dan Woodward pada tahun 1967*). Metode elemen hingga memberikan potensi besar untuk menangani permasalahan geoteknik karena kemampuannya untuk memodelkan perilaku ketegangan nonlinear tanah. Tanah yang sangat kompleks, sehingga perilaku elastis linear biasanya tidak cukup untuk menangkap perilaku masalah geoteknik

Beberapa keuntungan yang terkenal dari analisis elemen hingga dalam stabilitas lereng dirangkum berikut ini. Keuntungan utama dibandingkan dengan metode keseimbangan batas menurut *Griffiths dan Lane (1999)* yaitu :

1. Tidak ada asumsi yang harus dibuat mengenai bentuk atau lokasi permukaan lereng yang longsor
2. Karena tidak ada konsep irisan dalam pendekatan elemen hingga tidak ada kebutuhan untuk asumsi tentang kekuatan bidang gelincir lereng. Metode elemen hingga memenuhi keseimbangan sampai "kegagalan" tercapai.
3. Jika kompresibilitas tanah data tersedia, solusi elemen hingga akan memberikan informasi tentang deformasi pada tingkat tegangan yang bekerja kerja.

Metode keseimbangan batas adalah metode yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng untuk longsor tipe gelinciran rotasional dan translasional. Asumsinya yaitu geometri dari bentuk bidang longsor harus diketahui dan ditentukan terlebih dahulu.

Metode Fellenius, metode Bishop dan metode Spencer adalah metode kesetimbangan batas yang sering dijadikan pertimbangan dalam menentukan angka faktor keamanan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui algoritma perhitungan dengan metode keseimbangan batas (LEM) dengan cara Bishop & Fellenius dan juga metode Elemen Hingga (FEM) dengan program komputasi hingga didapatkan angka faktor keamanan.

Rumusan Masalah

Rumusan masalah ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana metoda yang paling efektif untuk analisis kestabilan lereng metode keseimbangan batas dan Elemen Hingga?
2. Bagaimana pemodelan perbaikan stabilitas lereng yang efektif untuk lereng tersebut?

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan faktor keamanan dengan Metode Elemen Hingga.
2. Menentukan faktor keamanan dengan keseimbangan batas (Bishop & Fellenius).
3. Membandingkan hasil faktor keamanan dari kedua

metode tersebut.

4. Menentukan pengaruh faktor keamanan dari pengaruh panjang dengan kemiringan.

Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Analisis stabilitas lereng dengan Metode Elemen Hingga menggunakan program (Plaxis).
2. Analisis stabilitas lereng dengan Keseimbangan Batas menggunakan metode Bishop & Fellenius (Rocscience slide).
3. Longsor yang dianalisis tipe rotasional (longsor busur).
4. Menggunakan data sekunder penyelidikan tanah.

LANDASAN TEORI

Analisis Kestabilan Lereng

Analisis stabilitas lereng umumnya didasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas (*limit plastic equilibrium*). Maksud dari analisis stabilitas adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial. Dalam analisis lereng, beberapa anggapan dibuat, yaitu :

1. Kelongsoran lereng terjadi di sepanjang permukaan bidang longsor tertentu dan dapat dianggap sebagai masalah bidang 2 dimensi.
2. Massa tanah yang longsor dianggap sebagai benda masif.
3. Tahanan geser dari massa tanah pada setiap titik sepanjang bidang longsor tidak tergantung dari orientasi permukaan longsor, atau dengan kata lain kuat geser tanah dianggap isotropis.
4. Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor potensial, dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsor. Jadi, kuat geser tanah mungkin terlampaui di titik-titik tertentu pada bidang longsornya, padahal faktor aman hasil hitungan lebih besar dari 1.

Faktor aman didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dan gaya yang mengerakkan, atau :

$$F = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (1)$$

Dengan τ adalah tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah (atau kuat geser yang tersedia), τ_d adalah tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor (atau kuat geser yang dimobilisasi oleh tanah untuk menjaga keseimbangan), dan F adalah faktor aman.

Menurut teori Mohr-Coulomb, tahanan geser maksimum (τ) yang dapat dimobilisasikan oleh tanah, di sepanjang bidang longsornya, dinyatakan oleh :

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

Dengan c = kohesi, σ = tegangan normal, dan φ = sudut gesek dalam tanah. Nilai-nilai c dan φ adalah parameter kuat geser tanah di sepanjang bidang longsor. ⁽²⁾

Dengan cara yang sama, dapat dituliskan persamaan tegangan geser yang terjadi (τ_d) akibat beban tanah dan beban-beban lain pada bidang longsornya :

$$\tau_d = c_d + \sigma_d \operatorname{tg} \varphi_d$$

Dengan c_d dan φ_d adalah kohesi dan sudut gesek dalam tanah yang terjadi atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang ⁽³⁾

longsornya.

Dari substitusi persamaan (2) dan (3) ke persamaan (1) diperoleh persamaan faktor aman,

$$F = \frac{c + \sigma \operatorname{tg} \varphi}{c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d} \quad (4)$$

Persamaan (5) dapat pula dituliskan dalam bentuk :

$$c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\operatorname{tg} \varphi}{F} \quad (5)$$

Faktor aman terhadap masing-masing komponen kuat geser :

$$F_c = \frac{c}{c_d} \quad (6)$$

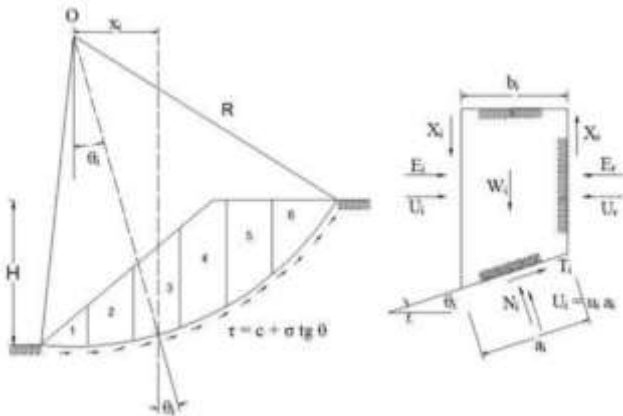
$$F_\varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_d} \quad (7)$$

Dengan F_c = faktor aman pada komponen kohesi dan F_φ = faktor aman pada komponen gesekan. Pada umumnya, metoda keseimbangan batas $F_c = F_\varphi$, hal ini menunjukkan komponen kohesi c dan gesekan (φ) dimobilisasi pada proporsi yang sama secara bersamaan di sepanjang bidang longsor.

Metode Irisan

Cara – cara analisis stabilitas yang telah dibahas sebelumnya hanya dapat digunakan bila tanah homogen. Bila tanah tidak homogen dan aliran rembesan terjadi di dalam tanah tidak menentu, cara yang lebih cocok adalah dengan metode irisan (*method of slices*).

Gaya normal yang bekerja pada suatu titik di lingkaran bidang longsor, terutama dipengaruhi oleh berat tanah di atas titik tersebut. Dalam metode irisan, massa tanah yang longsor dipecah – pecah menjadi beberapa irisan vertikal. Kemudian, keseimbangan dari tiap – tiap irisan diperhatikan. **Gambar 1** memperlihatkan satu irisan dengan gaya-gaya yang bekerja padanya. Gaya – gaya ini terdiri dari gaya geser (X_r dan X_l) dan gaya normal efektif (E_r dan E_l) di sepanjang sisi irisannya, dan juga resultan gaya geser efektif (T_i) dan resultan gaya normal efektif (N_i) yang bekerja di sepanjang dasar irisan. Tekanan air pori U_l dan U_r bekerja di kedua sisi irisan, dan tekanan air pori U_i bekerja pada dasarnya. Dianggap tekanan air pori sudah diketahui sebelumnya.



Gambar 1 Gaya – gaya yang bekerja pada irisan.

Analisis Dengan Metode Elemen Hingga (FEM)

Dengan menggunakan metoda keseimbangan batas dimungkinkan untuk melakukan evaluasi lereng dengan cepat. Tetapi, prosedur ini memberlakukan hitungan yang sama antara :

1. lereng timbunan baru,
2. lereng yang baru digali atau
3. lereng alami.

Tegangan-tegangan di dalam lereng ini sangat dipengaruhi oleh K_0 . Yaitu rasio tegangan lateral terhadap tegangan vertikal efektif. Tetapi perhitungan cara konvensional dengan metoda keseimbangan batas mengabaikan hal ini (Chowdhury, 1981). Dalam kenyataan, distribusi tegangan dalam ke tiga lereng tersebut di atas akan berbeda, dan oleh karena itu akan mempengaruhi stabilitasnya.

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) pertama kali dikenalkan oleh Clough dan Woodward (1967), tapi penggunaannya terbatas pada struktur dari material tanah yang kompleks. Untuk kasus khusus, metoda elemen hingga dapat mengakomodasi pengaruh penimbunan dan pengaliran secara bertahap, sehingga pengaruh sejarah tegangan dalam tanah terhadap deformasinya dapat ditelusuri. Akan tetapi, kualitas metoda elemen hingga secara langsung bergantung pada kemampuan dari model konstitutif yang dipilih untuk secara realitas mensimulasikan kelakuan non linear dari tanah pembentuk lereng. Untuk lereng galian dan lereng alam, model konstitutif hanya dapat benar-benar dikembangkan dengan uji lapangan kualitas tinggi yang didukung dengan pengamatan di lapangan.

Dalam memilih program yang cocok, pengguna harus mempertimbangkan :

1. Perkakas model konstitutif
2. Ketersediaan dari tipe-tipe elemen hingga yang berbeda (segitiga, segiempat, atau isoparametrik)
3. Data laboratorium dan lapangan yang dibutuhkan untuk mendefinisikan sifat-sifat tanah.

Dengan program yang dipilih, dapat ditentukan tegangan-tegangan dan deformasi lereng yang akan digunakan untuk mengevaluasi stabilitas lereng.

Walaupun metoda elemen hingga sangat berguna untuk para ahli geoteknik, namun metoda ini tidak selalu dapat digunakan dengan baik dalam analisis stabilitas lereng. Kesulitan terutama dalam hitungan faktor aman saat terjadinya keruntuhan. Pada cara keseimbangan batas, keruntuhan dapat digambarkan dengan kondisi di mana gaya-gaya atau momen yang menggerakkan melampaui gaya-gaya atau momen yang menahan, dan pada kondisi ini biasanya ditunjukkan dengan faktor aman yang kurang dari satu. Dalam metoda elemen hingga, tanah dimodelkan sebagai kumpulan elemen-elemen yang berlainan (*discrete*) dan kondisi keruntuhan merupakan fenomena progresif, di mana tidak setiap elemen runtuh secara simultan. Jadi keruntuhan merupakan kejadian yang bertahap, yaitu keruntuhan dari titik yang mengalami luluh lebih dulu, dan kemudian menunjukan dari titik yang mengalami luluh lebih dulu, dan kemudian menuju ke kedudukan final di mana seluruh elemen secara efektif telah runtuh. Beberapa kriteria keruntuhan yang telah dipakai pada saat ini adalah (Wong, 1984) :

- 1) Cembungan Garis Lereng (*Bulging of Slope Line*) (Snitbhan dan Chen, 1976). Kriteria ini digambarkan dengan perpindahan horisontal dari permukaan lereng, dan ditunjukkan dengan cara menspesifikasikan batas perpindahan horizontal yang masih ditoleransikan.
- 2) Geser Batas (*Limit Shear*) (Duncan dan Dunlop, 1969). Dalam kasus ini tegangan di sepanjang permukaan bidang longsor yang dihitung dari metoda elemen hingga digunakan secara langsung untuk menghitung faktor aman. Nilai faktor aman akan bergantung pada rasio kuat geser tersedia di sepanjang bidang longsor terhadap tegangan-tegangan yang dihitung dengan metoda elemen hingga.
- 3) Nonkonvergensi penyelesaian (*nonconvergence of the solution*) (Zienkiewicz, 1971). Keruntuhan diindikasikan

dengan runtuhnya elemen-elemen akibat kondisi pembebanan yang diberikan.

Bergantung pada kriteria keruntuhan yang dipilih, perbedaan dalam besarnya beban yang menyebabkan keruntuhan dapat sangat menonjol. Dengan lemahnya kriteria keruntuhan yang jelas, interpretasi dari hasil hitungan elemen hingga masih menjadi masalah, dan pengguna (*user*) sering harus percaya pada pengalaman dan intuisi untuk memahami kemampuan model numerik dalam memprediksi model fisik lereng yang mendekati kenyataan. Dengan mengingat ketidakpastian dan kelemahan metoda elemen hingga tersebut, maka cara pendekatan yang kompleks biasanya tidak digunakan dalam perancangan dan analisis lereng untuk jalan raya dan timbunan (Abramson et al., 1996).

Soil Nailing

Soil nailing termasuk upaya menstabilkan lereng secara in-situ dengan memperbesar gaya melawan atau momen penahan dengan cara mekanis. Kelebihan perkuatan ini antara lain tinggi fleksibilitas, struktur ringan, proses konstruksi sederhana, kecepatan pembangunan, ekonomis, dan sedikit dampak lingkungan (Tang dan Jiang 2015). *Soil nailing* termasuk teknik untuk stabilitas lereng dinding penahan tanah yang paling ekonomis karena sistem pekerjaan yang cepat dan tidak membutuhkan tempat yang luas. Pelaksanaan *soil nailing* cukup menggunakan peralatan *portable* yang mudah dipindah dan diubah sesuai kebutuhan dan kondisi lapangan yang disesuaikan dengan sudut kemiringan dinding tanah.

Metode ini mengkombinasikan perkuatan pasif dari batang baja dengan shotcrete. Menurut FHWA (1991), metode ini mulanya diperkirakan merupakan gabungan dari metode *rock bolting*, sistem multi-ankur, dan juga perkuatan tanah, yang terlihat beberapa kemiripannya dengan metode perkuatan *soil nailing*. Teknologi ini pertama kalinya digunakan pada 1972 dalam perkuatan penggalian lereng Kereta Versailles di Prancis setinggi 60 ft. Setelah keberhasilan proyek ini, metode *soil nailing* kemudian semakin berkembang di Prancis dan beberapa negara Eropa lainnya.

Soil nailing termasuk katagori perkuatan kaku (*rigid*) yang dapat memikul gaya normal, gaya lintang, dan gaya momen. Pada pekerjaan *soil nailing* untuk penahan galian, tulangan-tulangan umumnya terbuat dari batang-batang baja yang dipasang dengan cara menekan atau mengebor lebih dahulu dan kemudian *digrout*ing (ditutup dengan larutan semen). Perkuatan tanah dengan metode ini memanfaatkan tekanan pasif yang akan dikerahkan jika terjadi gerakan (Sinarta 2014). *Soil nailing* umumnya dipasang dengan sudut kemiringan antara 10° – 20° secara horizontal. Pada rentang sudut inklinasi ini, *grout* dapat mengalir dari muka lubang hingga mengisi ujung lubang galian, tanpa menyisakan kantung udara. FHWA (2015) menambahkan, pemasangan *soil nail* dengan sudut inklinasi dibawah 10° harus dihindari karena memungkinkan timbulnya *void* atau '*bird's beak*' yang dapat menurunkan kekuatan tarik dan menurunkan perlindungan terhadap korosi. Teknik *soil nailing* mampu meningkatkan stabilitas lereng, dinding penahan dan penggalian terutama melalui mobilisasi ketegangan di batang baja. Kekuatan tarik dikembangkan di batang baja terutama melalui interaksi gesekan antara batang baja dan tanah. Gaya tarik pada batang baja memperkuat tanah dengan langsung mendukung beberapa beban geser diterapkan dan dengan meningkatkan tekanan yang normal dalam tanah pada permukaan potensi kegagalan, sehingga memungkinkan tahanan geser yang lebih tinggi untuk dimobilisasi. Tanah yang diberikan batangan baja memberikan efek kekangan dengan

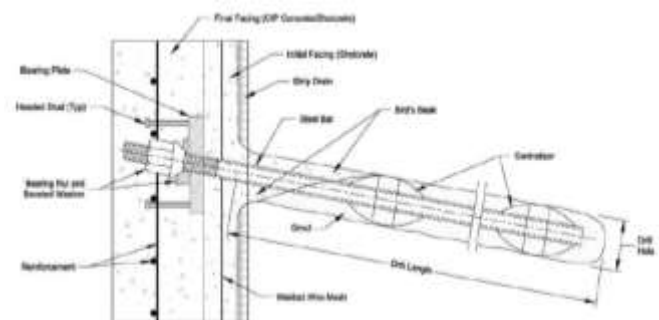
membatasi deformasi tanah dekat dengan normal ke permukaan lereng. Akibatnya, tegangan efektif rata-rata dan tahanan geser dari tanah di belakang perkuatan akan meningkat (Riogilang et al. 2014).

Untuk mendesain stabilitas *soil nailing* ini perlu dilakukan dua analisis (Sargawi et al. 2013), yaitu:

1. Analisis stabilitas internal, yaitu *soil nailing reinforcement* harus mampu memikul beban yang bekerja berupa gaya tarik dan gaya geser. Jika *soil nailing reinforcement* ini tidak mampu menahan gaya yang bekerja akan menyebabkan kegagalan lokal dan memicu *progressive failure*. Upaya meningkatkan kuat tarik *soil reinforcement* ini dapat dilakukan dengan memperpanjang atau memperbesar diameter.

2. Analisis stabilitas eksternal, yaitu analisis yang dilakukan untuk memastikan bahwa panjang *soil nailing* yang dibutuhkan mampu menahan stabilitas global.

Stabilitas internal sistem *soil nailing* biasanya dinilai menggunakan model dua zona, yaitu zona aktif dan zona pasif (zona tahan), yang dipisahkan oleh permukaan potensi kegagalan (Riogilang et al. 2014). Zona aktif adalah daerah di depan permukaan potensi kegagalan, di mana ia memiliki kecenderungan untuk melepaskan diri dari sistem tanah-dipaku. Zona pasif adalah wilayah di balik permukaan potensi kegagalan, di mana ia tetap lebih atau kurang utuh. *Soil nail* bertindak untuk mengikat zona aktif ke zona pasif. Secara umum komponen yang diperhatikan dalam penggunaan metode perkuatan dengan *soil nailing* adalah *nail bars*, *nail head*, *centralizer*, *grouting (cor beton)*, *wall facing*, dan sistem drainase. Detail komponen utama *soil nailing* (FHWA 2015), dapat dilihat dalam **Gambar 2**.



Gambar 2 Detail Komponen Utama *Soil Nailing*

Plaxis Sebagai Program Metode Elemen Hingga

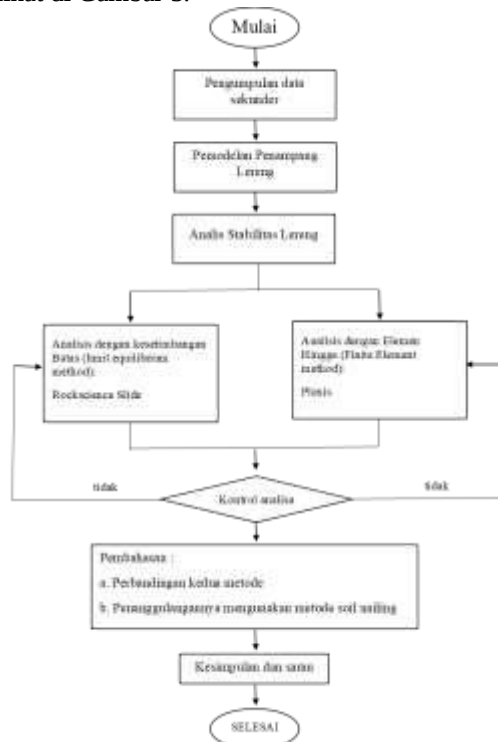
Plaxis adalah salah satu program aplikasi komputer yang menghitung konsolidasi dengan menggunakan teori konsolidasi Biot. Program ini melakukan perhitungan berdasarkan metode elemen hingga yang digunakan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas untuk berbagai aplikasi dalam bidang geoteknik.

Kondisi sesungguhnya dapat dimodelkan dalam regangan bidang maupun secara *axisymetris*. Program ini menerapkan metode antarmuka grafis yang mudah digunakan sehingga pengguna dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaringan elemen berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang ingin dianalisis. Program ini terdiri dari empat buah sub-program yaitu masukan, perhitungan, keluaran, dan kurva.

METODOLOGI

Diagram Alir

Adapun diagram alir yang dilakukan dalam tugas akhir ini dapat dilihat di Gambar 3.



Gambar 3 Diagram Alir

Pemodelan Lereng

Pemodelan lereng menggunakan program *Rockscience Slide* dengan data-data yang diperlukan sebagai berikut :

Data Parameter Tanah dan Geometri Lereng

Pada penelitian ini digunakan pemodelan lereng di Provinsi Sumatera Selatan dengan 6 lapisan tanah. Data tanah didapat dari hasil uji laboratorium tanah di lokasi tersebut.

Tabel 1 Data Tanah

Material	DATA				
	$\gamma_{sat} (kN/m^3)$	$\gamma_{unsat} (kN/m^3)$	c (kpa)	ϕ (°)	E (kpa)
Fill Material	16	14	7,2	27,05	6480
Soft Clays	14	12,5	19,2	27,53	17280
Silts	15	13	26,8	25	20100
Hard Clays	17	15	20	20	64800
Dense Sands	19	17	0	33	17500

a) Geometri Lereng

Pada penelitian ini digunakan pemodelan lereng dengan tinggi kemiringan lereng 15,913 m, panjang bidang miring 24,993 m dan sudut sebesar 40°

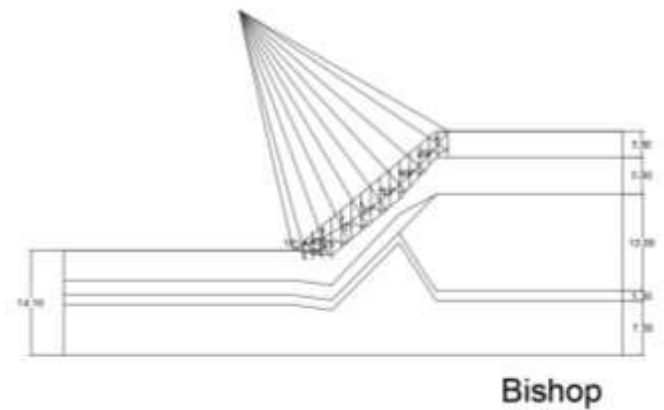


Gambar 4 Gambar Geometri Lereng

Stabilitas Lereng

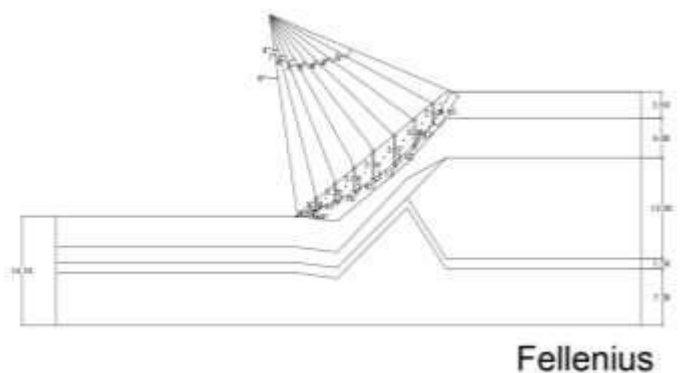
Pada penelitian ini digunakan pemodelan lereng dengan tipe rotasional (longsor busur). Menggunakan metode Bishop dan Fellenius

a) Perhitungan Manual Dengan Metode Bishop



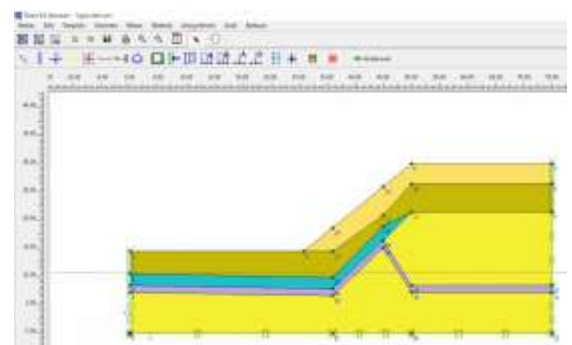
Gambar 5 Gambar Geometri Lereng Metode Bishop

b) Perhitungan Manual Dengan Metode Fellenius



Gambar 6 Gambar Geometri Lereng Metode Fellenius

c) Perhitungan dengan metode elemen hingga

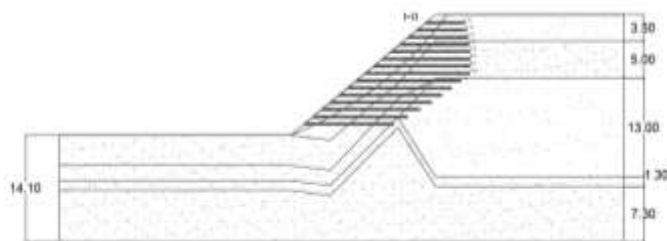


Gambar 7 Gambar Geometri Lereng Metode Elemen Hingga

Variasi Model Soil Nail

Dalam penelitian ini terbagi dalam 4 model yaitu :

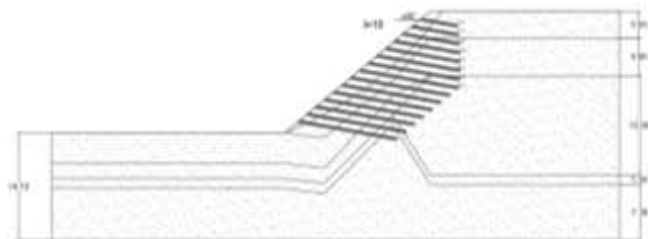
a) Model 1



Gambar 8 Model 1

Pada model tanah ini, perkuatan *Soil Nail* dengan kemiringan nail $i=0^\circ$ dengan variasi panjang $l = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ m.

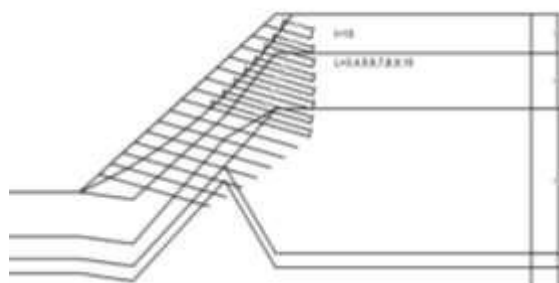
b) Model 2



Gambar 9 Model 2

Pada model tanah ini, perkuatan *Soil Nail* dengan kemiringan nail $i=10^\circ$ dengan variasi panjang $l = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ m.

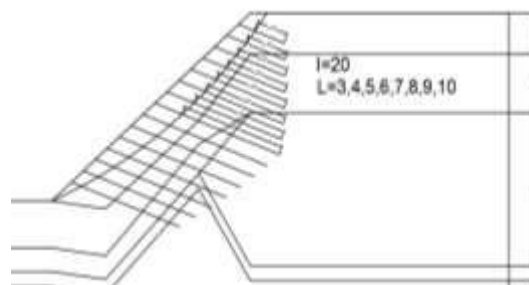
c) Model 3



Gambar 10 Model 3

Pada model tanah ini, perkuatan *Soil Nail* dengan kemiringan nail $i=15^\circ$ dengan variasi panjang $l = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ m.

d) Model 4



Gambar 11 Model 4

Pada model tanah ini, perkuatan *Soil Nail* dengan kemiringan nail $i=20^\circ$ dengan variasi panjang $l = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ m.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui algoritma perhitungan dengan metode keseimbangan batas (LEM) dengan cara Bishop & Fellenius menggunakan komputasi, manual dan juga metode Elemen Hingga (FEM) dengan program komputasi hingga didapatkan angka faktor keamanan.

Analisis Manual Bishop

Table 2 Analisis Manual Bishop

NO	b	c.b	xi	α	Sin α	Cos α	Tan α	W	W sin θ	W Cos θ	M
1	2,430	16,352	24,660	15	0,259	0,966	0,268	22,4	5,798	21,637	0,826
2	2,427	16,326	24,561	20	0,342	0,935	0,364	23,394	7,727	21,896	0,818
3	2,432	16,362	24,552	25	0,423	0,906	0,466	23,76	10,020	21,875	0,816
4	2,421	16,287	24,602	31	0,515	0,857	0,601	23,394	12,027	21,560	0,823
5	2,438	16,405	24,332	37	0,602	0,799	0,754	22	14,051	20,225	0,841
6	2,511	16,896	24,477	43	0,682	0,731	0,933	20,72	14,846	18,425	0,870
7	2,632	17,709	21,709	49	0,755	0,656	1,150	12,568	13,068	14,805	1,015
8	2,849	19,168	15,485	56	0,829	0,559	1,483	8,107	13,243	11,334	1,084
	20,143	125,507	489,137			6,434	6,018	723,548	343,720	426,131	547,915

Dari table berikut didapat $FS = 1.077$

Analisis Manual Fellenius

Table 3 Analisis Manual Fellenius

NO	a	θ	Sin θ	Cos θ	W	W Sin θ	W Cos θ	Tan f	0,472
1	2,6	11	0,191	0,982	25,6	4,885	25,130	c	6,728
2	2,67	17	0,292	0,956	70,864	20,719	67,768		
3	2,78	23	0,391	0,921	106,56	41,636	98,089		
4	2,93	29	0,485	0,875	131,36	63,685	114,890		
5	3,13	36	0,588	0,809	143,68	84,453	116,240		
6	3,42	44	0,695	0,719	140,8	97,808	101,283		
7	3,87	52	0,788	0,616	116,8	92,040	71,909		
8	4,65	61	0,875	0,485	60,16	52,617	29,166		
	26,05					457,842	624,474		

Dari table berikut didapat $FS = 1.026$

Hasil Perhitungan Soil Nail Kestimbangan Batas Metode Bishop

Tabel 4 Hasil Perhitungan keseimbangan batas Bishop (Rockscience slide)

Bishop											
Bidang Geser											
variabel	i	l	SF	variabel	i	l	SF	variabel	i	l	SF
	N90°										
1	3	1,276	1	3	1,431	1	3	1,43	1	3	1,43
2	4	1,43	2	4	1,433	2	4	1,437	2	4	1,438
3	5	1,431	3	5	1,437	3	5	1,46	3	5	1,541
4	6	1,432	4	6	1,458	4	6	1,543	4	6	1,596
5	7	1,483	5	7	1,505	5	7	1,584	5	7	1,596
6	8	1,491	6	8	1,543	6	8	1,596	6	8	1,613
7	9	1,494	7	9	1,61	7	9	1,638	7	9	1,65
8	10	1,539	8	10	1,638	8	10	1,648	8	10	1,667

Tabel 5 Hasil perhitungan keseimbangan batas Fellenius (*Rockscience* Dari grafik dapat dilihat angka kemanan lereng semakin bertambah seiring bertambahnya sudut kemiringan nail. Angka keamanan (SF) terbesar yaitu pada nail dengan kemiringan 20°, hingga pada kemiringan 0° yang memiliki nilai SF terkecil. Semakin miring nail angka keamanan (SF) semakin besar.

Fellenius											
Bidang Gelincir											
variasi ke	i	l	SF	variasi ke	i	l	SF	variasi ke	i	l	SF
1	0	3	1,449	1	0	3	1,351	1	0	3	1,351
2	0	4	1,351	2	0	4	1,351	2	0	4	1,354
3	0	5	1,351	3	0	5	1,351	3	0	5	1,401
4	0	6	1,364	4	0	6	1,385	4	0	6	1,487
5	0	7	1,418	5	0	7	1,419	5	0	7	1,487
6	0	8	1,421	6	0	8	1,438	6	0	8	1,472
7	0	9	1,422	7	0	9	1,5	7	0	9	1,5
8	0	10	1,478	8	0	10	1,5	8	0	10	1,5

Hasil Perhitungan Soil Nail Elemen Hingga

Tabel 6 Hasil Perhitungan Pada Metode Elemen Hingga

PLAXIS								
Bidang Gelincir								
i	variasi ke	l	NODE TO NODE		PLATE		GEOGRID	
			SF	MESH	SF PLATE	MESH	SF	MESH
0	1	3	1,3026	977	1,2914	831	1,3269	819
	2	4	1,3559	1027	1,3143	837	1,3852	835
	3	5	1,4358	1023	1,3691	853	1,4282	853
	4	6	1,4360	1063	1,3701	901	1,4297	907
	5	7	1,4459	1091	1,4216	953	1,4468	941
	6	8	1,4685	1157	1,4216	953	1,4747	965
	7	9	1,4936	1239	1,4287	979	1,4841	1007
	8	10	1,5259	1275	1,4769	1015	1,5305	1029
10	1	3	1,3504	939	1,35	821	1,4082	821
	2	4	1,4403	971	1,3881	841	1,4356	837
	3	5	1,4693	967	1,4267	859	1,4759	859
	4	6	1,4884	1025	1,449	901	1,4967	899
	5	7	1,5495	1207	1,4837	913	1,5398	911
	6	8	1,5668	1225	1,4975	967	1,5571	965
	7	9	1,5913	1277	1,5233	987	1,5869	985
	8	10	1,6154	1439	1,5327	997	1,6092	981
15	1	3	1,4297	552	1,4182	484	1,4289	793
	2	4	1,4804	572	1,4481	518	1,4544	837
	3	5	1,4935	927	1,4937	536	1,5125	875
	4	6	1,5317	997	1,5153	574	1,5357	895
	5	7	1,5857	628	1,5429	564	1,5632	925
	6	8	1,5909	1073	1,566	612	1,5883	959
	7	9	1,6264	1213	1,6055	622	1,6198	1003
	8	10	1,6563	1165	1,6287	642	1,6537	1033
20	1	3	1,4429	745	1,421	482	1,4601	811
	2	4	1,5088	759	1,4752	510	1,5107	849
	3	5	1,5281	767	1,516	546	1,5314	853
	4	6	1,5631	773	1,5354	574	1,5677	927
	5	7	1,5878	787	1,5626	576	1,5916	911
	6	8	1,6326	775	1,5927	582	1,6233	955
	7	9	1,6696	757	1,6173	632	1,6592	985
	8	10	1,7085	823	1,6573	630	1,6906	989

Hubungan Kemiringan Nail Dengan Angka Keamanan (SF) Dengan Metode Elemen Hingga (Plaxis)

Tabel 7 Hubungan Kemiringan Lereng Terhadap Kenaikan (SF)

PLAXIS											
Bidang Gelincir											
i	variasi ke	l	NODE TO NODE			PLATE			GEOGRID		
			SF	Selish	persentase	SF	Selish	persentase	SF	Selish	persentase
0	1	3	1,3026	0,227	34,513	1,3951	0,3455	31,473	1,5059	0,2819	26,88
	2	4	1,3524	0,185	29,114	1,3780	0,3041	29,073	1,4982	0,1621	14,80
	3	5	1,4297	0,282	38,494	1,4182	0,3735	37,394	1,4759	0,3920	38,49
	4	6	1,4429	0,397	37,928	1,4329	0,3731	37,884	1,4801	0,4142	39,85
	5	7	1,4459	0,397	37,928	1,4329	0,3731	37,884	1,4801	0,4142	39,85

Pada variasi panjang lereng 3 meter menunjukkan kenaikan nilai angka keamanan (SF) yang cukup signifikan seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan nail yang bervariasi i=0°,10°,15°,20°. Berikut adalah grafik hubungan panjang nail dengan angka kemanan (SF) pada gambar 4.30 berikut :



Gambar 12 Hasil Perhitungan Elemen Hingga

Dari grafik dapat dilihat angka kemanan lereng semakin bertambah seiring bertambahnya sudut kemiringan nail. Angka keamanan (SF) terbesar yaitu pada nail dengan kemiringan 20°, hingga pada kemiringan 0° yang memiliki nilai SF terkecil. Semakin miring nail angka keamanan (SF) semakin besar.

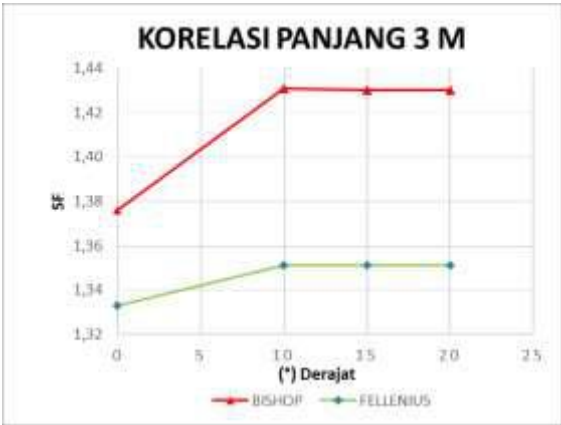
Kenaikan rata-rata angka keamanan lereng dari kemiringan nail i=0° dengan program Plaxis ±24.961%, pada kemiringan nail i=10° dengan program Plaxis ±30.943%, pada kemiringan nail i=15° dengan program Plaxis ±36.304%, sedangkan pada kemiringan nail i=20° dengan program Plaxis ±37.808%.

Hubungan Kemiringan Nail Dengan Angka Keamanan (SF) Dengan Metode Keseimbangan Batas Bishop & Fellenius (Rocscience slide)

Tabel 8 Hubungan Kemiringan Lereng Terhadap Kenaikan (SF)

SLIDE							
l	variasi ke	i	BISHOP			FELLENIUS	
			SF	Selish	persentase	SF	Selish
3	1	0	1,3760	0,3301	31,561	1,3330	0,2871
	2	10	1,4310	0,3851	36,820	1,3510	0,3051
	3	15	1,4300	0,3841	36,724	1,3510	0,3051
	4	20	1,4300	0,3841	36,724	1,3510	0,3051
	5	25	1,4300	0,3841	36,724	1,3510	0,3051

Pada variasi panjang lereng 3 meter menunjukkan kenaikan nilai angka keamanan (SF) yang cukup signifikan seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan nail yang bervariasi i=0°,10°,15°,20°. Berikut adalah grafik hubungan panjang nail dengan angka kemanan (SF) pada gambar 4.31 berikut :



Gambar 13 Hasil perhitungan keseimbangan batas Bishop & Fellenius

Dari grafik dapat dilihat angka kemanan lereng bertambah dan konstan pada suatu sudut kemiringan nail. Angka keamanan (SF) terbesar yaitu pada nail dengan kemiringan 20°, hingga pada kemiringan 0° yang memiliki nilai SF terkecil. Semakin miring nail angka keamanan (SF) semakin besar.

Kenaikan rata-rata angka keamanan lereng dari kemiringan nail i=0° dengan program slide ±29.506%, pada kemiringan nail i=10° dengan program slide ±32.996%, pada kemiringan nail i=15° dengan program slide ±32.948%, sedangkan pada kemiringan nail i=20° dengan program slide ±32.948%.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini yaitu :

1. Metode Elemen Hingga dengan Metode Keseimbangan Batas mempunyai perbedaan saat menjelaskan hubungan antara panjang dengan SF dan hubungan kemiringan dengan SF.
2. Metode Elemen Hingga sangat peka terhadap perubahan kemiringan lereng dibandingkan Metode Keseimbangan Batas.
3. Metode Elemen Hingga mempunyai kelebihan untuk memodelkan *Soil Nail* dikarenakan mempunyai pendekatan-pendekatan sifat bahan melalui *Tools* seperti : *Node To Node, Plate & Geogrid*
4. Metode Elemen Hingga lebih teliti dibandingkan Metode Keseimbangan Batas karena menggunakan ketelitian node yang diteliti berdasarkan displacement atau perpindahan setiap titik simpul pada elemen dari lereng yang dan parameter yang dimasukan lebih banyak dibandingkan Metode Keseimbangan Batas.
5. Kenaikan rata-rata angka keamanan lereng dari kemiringan nail $i=0^\circ$ dengan program Plaxis $\pm 24.961\%$ sedangkan program slide $\pm 29.506\%$, pada kemiringan nail $i=10^\circ$ dengan program Plaxis $\pm 30.943\%$ sedangkan program slide $\pm 32.996\%$, pada kemiringan nail $i=15^\circ$ dengan program Plaxis $\pm 36.304\%$ sedangkan program slide $\pm 32.948\%$, pada kemiringan nail $i=20^\circ$ dengan program Plaxis $\pm 37.808\%$ sedangkan program slide $\pm 32.948\%$.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, maka perlu adanya penelitian lanjut untuk melengkapi dan mengembangkan tema penelitian ini. Adapun saran-saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya :

1. Menerapkan posisi beban yang bervariasi, jika ingin dibangun jalan didekat lereng tersebut.
2. Menambahkan variasi jarak antar *nail* untuk mengetahui jarak-jarak antar *nail* yang lebih optimal.
3. Untuk perhitungan keseimbangan batas disarankan menggunakan jumlah irisan lebih dari 50 irisan, agar mendapat angka SF yang lebih detail.
4. Menggunakan *software* Abaqus agar bisa menyeragamkan jumlah *mesh* saat *running*.
5. Membandingkan dengan penerapan langsung di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Hoek and Bray, J., 1981, *Rock Slope Engineering 4rd Ed.*, The Institution of Mining and Metallurgy, London. Pg. 176-189

Han, Jie, 2015, *Principles and practice of ground improvement / Jie Han*. By John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, Canada.

Huang, Y. H., 1993, *Stability Analysis of Earth Slope*, Van Nostrand Reinhold, Newyork.

Hary Christady Hardiyatmo , 2012, *Tanah Longsor Dan Erosi - Kejadian dan Penanganan*, By Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.