

ANALISIS PERKUATAN LERENG MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT METHOD*

Andarsin Ongko¹⁾, Soewigno Agus Nugroho²⁾, Muhamad Yusa²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode 28293

Email : andarsin.ongko@student.unri.ac.id

ABSTRACT

Landslides are ones of disasters which oftenly occurred in Indonesia. This research aims to analyze some slope reinforcements which are modeled by using a based finite element method software, i.e. plaxis v.8.2. As initial data, slope's dimension was measured from real field, and soil samples were taken to obtain the soil properties. Those data were used as input parameters in modeling. The slope was modeled in several conditions, i.e. existing condition, variation of ground water table, reinforcement with backfill model, terraces model, and soil nailing model. The results shown that safety factor has decreased due to the increment of ground water table. The highest safety factor was reached when the slope was reinforced with soil noiling model, with the magnitude of 2,044.

Keywords : landslides, finite element method, soil nailing, safety factor.

A. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang terletak di garis khatulistiwa dengan potensi bencana alam yang cukup tinggi. Salah satu bencana alam yang paling sering melanda Indonesia, khususnya wilayah perbukitan dan sekitarnya adalah tanah longsor. Bencana ini termasuk peringkat ke-tiga tertinggi yang terekam oleh BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana), pada tahun 2016-2017.

Berbagai lokasi di negara Indonesia kerap menjumpai permasalahan yang timbul akibat bencana tanah longsor. Salah satu lokasi yang paling sering tertimpa bencana ini adalah provinsi Sumatera Barat dan Riau. Adapun lokasi dari bencana tanah longsor di kedua provinsi ini adalah jalan lintas Sumatera Barat – Riau.

Permasalahan yang timbul dari bencana tanah longsor ini pun beraneka-ragam. Namun, permasalahan yang paling mencolok adalah terkait jumlah korban

jiwa serta lumpuhnya transportasi darat di sepanjang jalan yang tertimbun oleh tanah longsor tersebut. Mengingat bahwa perpindahan moda transportasi adalah melalui jalur darat, sehingga bencana ini sering mengakibatkan putusnya jalur transportasi darat antara Sumatera Barat dan Riau. Putusnya jalur transportasi ini tentu mengakibatkan kerugian dari berbagai aspek, seperti aspek ekonomi dan sosial kemanusiaan.

Oleh sebab itu, tindakan terkait penanggulangan longsor sangatlah diperlukan. Penanggulangan dapat berupa identifikasi zona rawan longsor, serta analisis stabilitas lereng. Berbagai metode analisis dapat digunakan untuk mengevaluasi/ memberi penilaian terkait tingkat kerawanan longsor dari sebuah lereng guna memberi peringatan dini tentang bahaya longsor. Salah satunya adalah dengan *Finite Element Method*. Metode ini memungkinkan untuk melakukan pemodelan jenis-jenis struktur/ bentuk geometri tertentu dan kondisi

lapangan yang rumit menjadi bentuk yang lebih sederhana untuk dilakukan analisis lebih lanjut.

Sesuai permasalahan terkait longsor dan analisisnya, maka dilakukan penelitian terkait tanah longsor, analisis parameter tanah yang mengakibatkan longsor serta penanggulangannya yang berdasar pada metode elemen hingga (*Finite Element Method*).

B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Tanah Longsor

Secara general, tanah longsor merupakan sebuah fenomena pergerakan tanah yang meluncur ke bawah sebagai akibat dari lemahnya gaya penahan beban terhadap beban itu sendiri. Menurut Naryanto (2011), Tanah longsor atau gerakan tanah merupakan gerakan suatu massa batuan atau tanah pada suatu lereng tertentu yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi. Gerakan tersebut terjadi karena adanya gangguan kesetimbangan antara gaya penahan (*shear strength*) dengan gaya peluncur (*shear stress*).

Menurut Prawiradisastra (2008), bila bencana ini terjadi di kawasan pemukiman penduduk, potensi timbulnya korban jiwa akan semakin meningkat. Gambar 1 merupakan contoh peristiwa longsor di area pemukiman penduduk.



Gambar 1 Longsor di Pemukiman Penduduk

Sumber : Prawiradisastra, 2008

B.2 Faktor Penyebab Tanah Longsor

Menurut Hardiyatmo (2002), bencana tanah longsor dapat disebabkan oleh berbagai faktor sebagai berikut:

1. Beban yang berlebihan pada lereng.
2. Curah hujan yang tinggi.
3. Aktivitas manusia (penggalian dan deforestasi hutan)
4. Perubahan muka air dalam kurun waktu yang singkat
5. Gempa bumi yang mengakibatkan munculnya retakan

B.3 Mekanisme Tanah Longsor

Kronologis kejadian tanah longsor biasanya hampir sama dalam setiap kasus. Dimana, awal mula kejadian longsor adalah diawali oleh peristiwa hujan (presipitasi). Air hujan akan diserap ke dalam tanah yang mana mengakibatkan beban/ massa tanah bertambah. Kemudian, air hujan akan bergerak vertikal ke bawah sebagai akibat dari pengaruh gaya gravitasi. Bila air tersebut mencapai lapisan tanah yang kedap (*impermeable*), akan mengakibatkan air bergerak ke samping dan menciptakan bidang longsor. Kombinasi beban air, massa tanah serta beban konstruksi di atas lereng akan mengakibatkan meluncurnya tanah bila tegangan geser tanah tidak sanggup menahan kombinasi beban-beban tersebut.

B.4 Jenis-Jenis Longsor

Menurut Muntohar (2006) dan Highland (2004), terdapat beberapa jenis longsor berdasarkan tipe pergerakan tanah yang terjadi, yakni sebagai berikut:

1. Keruntuhan geser/ longsor (*sliding failures*)
2. Reruntuhan batuan (*fall failures*)
3. Jatuhan (*toppling failures*)
4. Longsor aliran (*flow failures*)

B.5 Angka Keamanan

Salah satu parameter penting dalam menentukan tingkat keamanan sebuah lereng terhadap longsor adalah angka keamanan (*safety factor*). Metode perhitungannya adalah dengan membandingkan tegangan yang mengakibatkan keruntuhan lereng dengan kekuatan geser tanah untuk menahannya.

Menurut Das (2008), angka keamanan dapat dirumuskan sebagai :

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

dengan F_s adalah angka keamanan terhadap kekuatan tanah, τ_f adalah kuat geser rata-rata dari tanah dan τ_d adalah kuat geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor.

B.6 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numeris yang bisa digunakan untuk menyelesaikan berbagai persoalan analisis geoteknik dan struktur, dengan bentuk geometri sederhana (*discrete elements*) hingga bentuk yang rumit/kompleks (*continuum elements*).

Menurut Rao (2010), prosedur/langkah-langkah metode elemen hingga terdiri dari beberapa sebagai berikut:

1. Membagi model/ geometri tertentu menjadi elemen diskrit. Proses ini disebut juga sebagai diskritisasi.
2. Memilih persamaan interpolasi yang sesuai dengan model yang digunakan. Persamaan ini dibutuhkan untuk menghasilkan hasil yang mendekati hasil sebenarnya, dan biasanya berwujud polinomial.
3. Menyelesaikan keseluruhan persamaan interpolasi untuk seluruh elemen yang telah dibagi.
4. Menyelesaikan perhitungan tegangan dan regangan. Perhitungan ini dibutuhkan khususnya untuk elemen yang bersifat struktural.

Program *Plaxis* merupakan salah satu program yang berbasis metode elemen hingga. Berdasarkan penelitian Krisnawan (2003) dan Yanuar (2004), telah membuktikan bahwa program ini dapat digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng serta menyelesaikan permasalahan geoteknik yang terjadi. Dengan program ini, dapat dilakukan pemodelan geoteknik di lapangan dengan memasukkan data-data yang dibutuhkan.

B.7 Shear Strength Reduction

Shear Strength Reduction Method merupakan suatu metode yang digunakan dengan tujuan untuk mereduksi parameter kekuatan tanah. Parameter yang dimaksud adalah kohesi dan sudut gesek dalam (*internal friction angle*). Menurut Dawson dan Roth (1999) dalam Cala et. al (2004), tujuan reduksi tersebut adalah mendapatkan kondisi tanah yang kritis (faktor keamanan sebesar 1).

Menurut Yacoub (2016), persamaan umum kondisi parameter tanah sebelum direduksi sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (2)$$

sedangkan untuk kondisi sesudah direduksi dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\tau = \frac{C}{SF} + \sigma \cdot \frac{\tan \phi}{SF} \quad (3)$$

dengan C adalah kohesi tanah (kPa), ϕ adalah sudut gesek dalam ($^{\circ}$), SF adalah faktor keamanan, σ adalah tegangan normal (kPa), dan τ adalah tegangan geser (kPa).

B.8 Parameter Tanah

Dalam penggunaan program *Plaxis*, dibutuhkan beberapa input parameter awal. Parameter-parameter ini berupa sifat – sifat fisis (*properties*) tanah, yakni sebagai berikut :

1. Berat volume tanah (γ)
2. Permeabilitas (k)
3. Modulus elastisitas tanah (ϵ)
4. *Poisson ratio* (ν)
5. Kohesi (c)
6. Sudut geser dalam (ϕ)

B.9 Perkuatan Lereng

Lereng yang mudah mengalami kelongsoran tentu akan menimbulkan kekhawatiran bagi masyarakat yang tinggal di sekitar lereng tersebut. Selain itu, bila material longsor sampai ke badan jalan, maka akan mengakibatkan kegiatan perpindahan/ transportasi setempat

menjadi terhambat. Oleh sebab itu, diperlukan suatu mekanisme perkuatan lereng terhadap lereng yang dianggap mudah mengalami kelongsoran.

Menurut Hardiyatmo (2003), metode perkuatan dan perbaikan lereng dapat dilakukan dengan 3 metode :

1. Metode geometri, dengan mengubah geometri/ bentuk muka lerengnya. Metodenya adalah dengan menggali bagian atas lereng, kemudian hasil galian tersebut ditimbun ke daerah yang curam untuk mengurangi tingkat kecuraman lereng.
2. Metode hidrologi, yaitu dengan menurunkan muka air tanah pada lereng. Tekniknya adalah dengan bantuan pompa.
3. Metode mekanis, yaitu dengan memasang bahan tambahan tertentu seperti bangunan/ struktur yang bertujuan untuk memperkuat lereng.

C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di laboratorium Mekanika Tanah dan Batuan Universitas Riau.

C.2 Sampel dan Peralatan

Sampel yang digunakan adalah tanah yang diambil dari lereng yang terletak di ruas jalan penghubung antara provinsi Riau dan Sumatera Barat.

Adapun peralatan yang digunakan untuk pengujian sampel tanah adalah timbangan, cawan, ring, alat uji geser, alat pengujian permeabilitas, oven, serta komputer dengan *software Plaxis*.

C.3 Prosedur Penelitian

C.3.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahapan paling awal yang bertujuan untuk memperoleh gambaran masalah untuk diteliti. Materi yang digunakan sebagai referensi berasal dari berbagai sumber, yaitu buku, jurnal nasional dan jurnal internasional yang berkaitan dengan bidang ilmu geoteknik, terutama mekanika tanah dan analisa kestabilan lereng.

C.3.2 Survey dan Sampling

Survey bertujuan untuk melakukan observasi lapangan serta melakukan pengukuran dimensi lereng.

C.3.3 Pengujian Laboratorium

Sampel yang telah diperoleh dari lapangan, selanjutnya diuji di dalam laboratorium untuk memperoleh sifat-sifat (*properties*) dari sampel tanah tersebut.

C.3.4 Studi Aplikasi Geoteknik Plaxis

Langkah berikutnya adalah mempelajari program *plaxis* yang merupakan program utama dalam menyelesaikan penelitian ini. Pembelajaran ini mencakup kemampuan, cara kerja program, hingga menu perintah yang digunakan dalam program *plaxis* ini.

C.3.5. Input data dan Simulasi Numeris

Data yang diperoleh dari hasil uji laboratorium, serta data pengukuran dimensi lereng di lapangan, selanjutnya akan digunakan sebagai data input dalam program *plaxis*.

Dengan menggunakan program *plaxis*, dapat dimodelkan lereng yang berada di lapangan. Di samping pemodelan lereng, program *plaxis* juga memungkinkan untuk melakukan pemodelan perkuatan lereng. Adapun hasil/*output* dari penggunaan program ini adalah angka keamanan (FK), deformasi, serta gaya-gaya yang bekerja di sepanjang bidang lereng.

C.3.6. Pembahasan

Setelah perhitungan numeris selesai dilakukan, maka dapat dilakukan analisa terhadap kelongsoran lereng, pergeseran, serta besarnya faktor aman/angka keamanan pada setiap variasi perhitungan.

C.3.7. Kesimpulan

Sebagai tahap akhir dari penelitian, kesimpulan-kesimpulan yang terkait dengan proses pemodelan lereng beserta struktur perkuatannya dapat diambil sebagai informasi untuk penelitian berikutnya.

D. Hasil dan Pembahasan

D.1 Profil Lereng dan Data Tanah

Gambar 2 dan 3 menunjukkan tampak atas dan tampak depan lereng yang dijadikan objek observasi.



Gambar 2 Tampak atas lereng



Gambar 3. Tampak depan lereng

Hasil observasi menunjukkan bahwa lereng yang ditinjau terdiri dari 3 (tiga) lapisan dengan karakteristik yang berbeda-beda. Tabel 1 hasil pengujian parameter tanah untuk setiap lapisan.

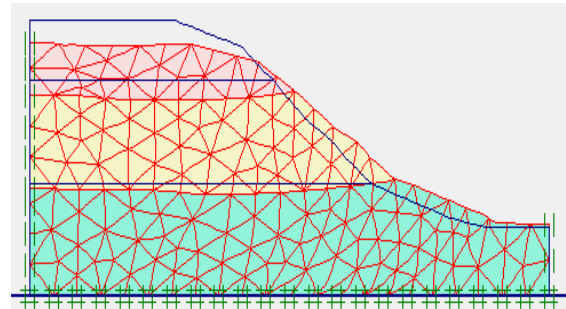
Tabel 1. Parameter tanah

Properties	Lapisan Atas	Lapisan Tengah	Lapisan Bawah
γ unsat (kN/m^3)	11,6	10,5	10,4
γ sat (kN/m^3)	15,5	16,6	16,4
k (m/day)	0,07	0,06	0,04
E (kN/m^2)	9810	4905	5000
v	0,3	0,3	0,3
C (kN/m^2)	0,05*	36,1**	33,0**
ϕ (°)	38,9*	6,4**	6,8**

Keterangan:
 *Dari uji Direct Shear
 **Dari UU triaxial

D.2 Kondisi Existing Lereng

Hasil *running* program *Plaxis v.8.2* pada kondisi *existing*, dapat dilihat pada Gambar 4. sebagai berikut:



Gambar 4. Deformed mesh kondisi existing

Berdasarkan hasil analisis, faktor keamanan yang diperoleh pada pemodelan kondisi *existing* adalah sebesar 1,149.

D.3 Kondisi Lereng Tepat Runtuh

Menggunakan *shear strength reduction*, parameter kohesi dan sudut geser dalam tanah akan dikurangi secara bertahap. Proses ini terus berlangsung hingga lereng mengalami kondisi tepat runtuh ($FK = 1$).

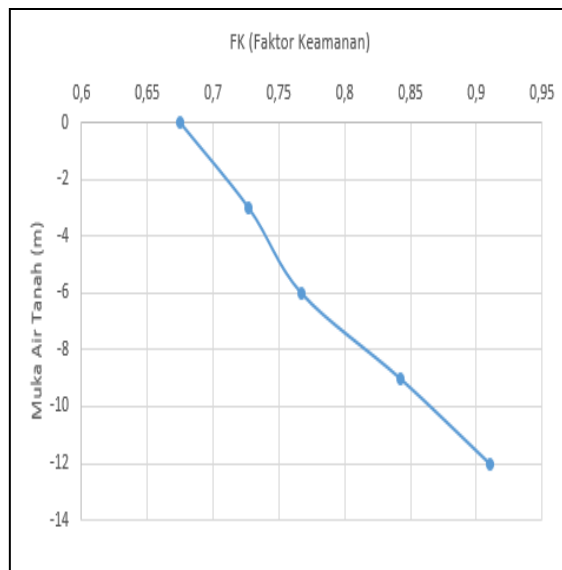
Proses reduksi kohesi dan sudut geser dalam dapat dilihat dalam Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Parameter Tanah Tepat Runtuh

Tahap	Lapisan	Kohesi (kN/m^2)	Sudut Geser Dalam (°)	SF (Faktor Keamanan)	Status
1	Atas	0,05	38,9	1,149	>1,0. Belum Runtuh
	Tengah	36,1	6,4		
	Bawah	33,0	6,8		
2	Atas	0,04	35,1	1,009	$\approx 1,0$ Tepat Runtuh
	Tengah	31,4	5,6		
	Bawah	28,7	5,9		
3	Atas	0,04	34,8	1,000	Tepat Runtuh
	Tengah	31,2	5,5		
	Bawah	28,5	5,9		

D.4 Variasi Muka Air Tanah

Pada penelitian ini, garis muka air tanah dimodelkan dengan berbagai variasi, yaitu dengan elevasi 0 m, -3 m, -6 m, -9 m, dan -12 m dari lapisan teratas lereng. Hasil pemodelan dan faktor keamanan yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 5. Grafik muka air tanah Versus faktor keamanan

Berdasarkan hasil analisis, dapat dilihat bahwa peningkatan level muka air tanah mengakibatkan faktor keamanan yang semakin menurun. Faktor keamanan terendah terjadi sewaktu muka air tanah mendekati muka tanah yaitu sebesar 0,675. Hal ini menandakan bahwa lereng telah mengalami keruntuhan pada kondisi ini.

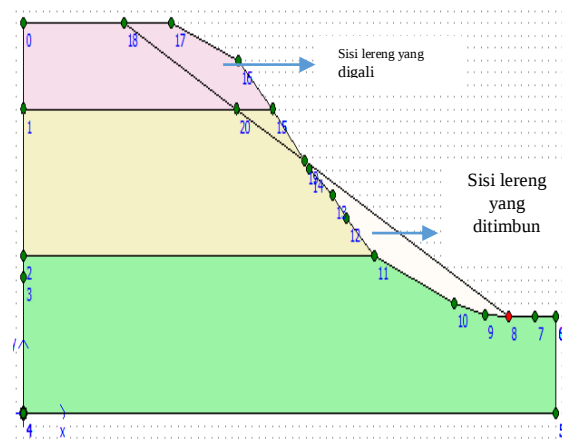
D.4 Pemodelan Perkuatan Lereng

Pemodelan perkuatan lereng merupakan tahapan yang dilakukan dengan harapan dapat meningkatkan kestabilan lereng. Dalam penelitian ini, perkuatan lereng dimodelkan dalam dua kondisi, yakni kondisi kering (tanpa muka air tanah), dan kondisi basah (muka air tanah pada elevasi 0 m dan sedikit di bawah muka lereng). Adapun jenis perkuatan yang dimodelkan adalah sebagai berikut:

D.4.1 Metode Gali Timbun (Cut and Fill)

Metode ini bertujuan untuk mengurangi kecuraman lereng dengan cara menggali sisi bagian atas lereng dan menimbun bagian bawah lereng sehingga kecuraman lereng akan berkurang dan faktor keamanan akan meningkat.

Pemodelan dengan metode gali timbun dapat dilihat pada Gambar 6 sebagai berikut:



Gambar 6. Pemodelan sistem gali timbun sebagai perkuatan lereng

Dengan menggali bagian lereng yang di atas dan menimbun bagian lereng yang berada di bawah, maka geometri lereng akan menjadi lebih landai. Dalam penelitian ini, material timbunan yang digunakan adalah material yang sejenis dengan lapisan tengah dari lereng tersebut. Adapun *properties* material timbunan yang digunakan tertera pada tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. *Properties* tanah timbunan

Properties	Timbunan
γ_{unsat} (kN/m ³)	10,531
γ_{sat} (kN/m ³)	16,636
k (m/day)	0,060
E (kN/m ²)	4905
ν	0,300
C (kN/m ²)	36,175
ϕ (°)	6,453

Berdasarkan hasil analisis dengan program *plaxis* v.8.2, pemberian timbunan pada lereng memberikan dampak yang cukup besar. Pada kondisi kering (tanpa muka air tanah), faktor keamanan yang dihasilkan adalah sebesar 1,431. Sedangkan pada kondisi basah (elevasi

muka air tanah setara dengan muka lereng), faktor keamanan yang dihasilkan adalah sebesar 0,84. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian timbunan dapat meningkatkan faktor keamanan lereng pada kondisi kering dan basah, meskipun belum dapat dikatakan aman pada kondisi basah dikarenakan faktor keamanan masih di bawah 1.

D.4.2 Pemodelan Terasering

Terasering merupakan metode yang digunakan untuk mengurangi potensi terjadinya erosi pada suatu lereng. Secara umum, tampilan terasering adalah berupa sisi lereng dibuat seperti anak tangga (berundak-undak) sehingga dapat memperlambat laju air mengalir.

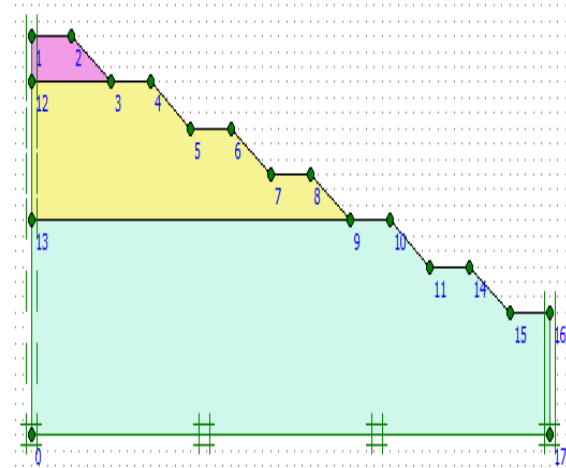
Dalam penerapan di lapangan, terasering sering dijumpai di lereng-lereng di berbagai daerah. Pembuatan terasering merupakan metode yang dianggap mumpuni dalam mencegah terjadinya potensi longsor serta menurunkan laju erosi pada lereng.

Dalam penelitian ini, pemodelan terasering dilakukan sebagai salah satu alternatif perkuatan lereng. Dengan bentuk sisi lereng seperti anak tangga, diharapkan dapat mengurangi massa tanah dan meningkatkan faktor keamanan lereng.

Adapun spasi (jarak) yang digunakan dalam pemodelan terasering ini adalah sebagai berikut:

1. Spasi horizontal (jarak mendatar) pada setiap kaki terasering adalah sebesar 5 meter.
2. Setelah spasi horizontal sebesar 5 meter, sisi terasering mengalami penurunan 3 meter untuk 5 meter spasi horizontal berikutnya.
3. Besar sudut kaki terasering terhadap sumbu x (horizontal) adalah 30° .

Pemodelan dengan metode gali timbun dapat dilihat pada Gambar 7 sebagai berikut:



Gambar 7. Pemodelan terasering

Berdasarkan hasil analisis, pembuatan terasering pada sisi lereng memberikan efek yang cukup besar. Pada kondisi tanpa muka air tanah, faktor keamanan yang dihasilkan lereng adalah 1,855. Sedangkan untuk kondisi dengan muka air tanah, faktor keamanan yang dihasilkan adalah 1,148. Hal ini membuktikan bahwa pembuatan terasering sangat efektif untuk meningkatkan stabilitas lereng.

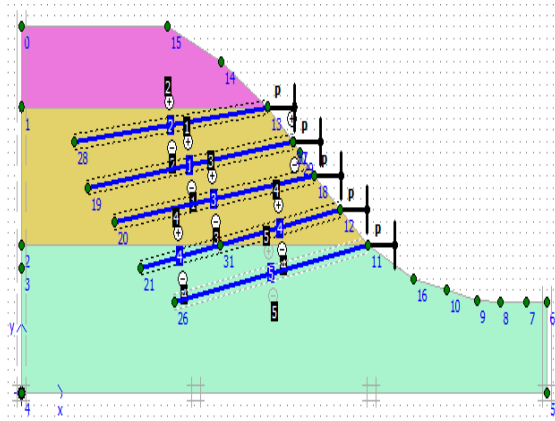
D.4.3 Pemodelan Soil nailing

Salah satu jenis perkuatan lereng yang dapat dimanfaatkan adalah dengan menggunakan konstruksi tambahan. Konstruksi ini merupakan konstruksi struktural yang dibangun dan ditanamkan di dalam lereng dengan tujuan untuk meningkatkan faktor keamanan lereng.

Dalam program *plaxis v.8.2*, pemodelan perkuatan lereng dibantu dengan perintah *anchor*, *geogrid*, dan *plate*. Dalam penelitian ini, jenis perkuatan lereng yang digunakan adalah kombinasi antara *plate* dengan *fixed end anchor* sebagai model *soil nailing*.

Setelah *properties* pelat dan angkur sudah ditetapkan, selanjutnya adalah menggambarkan pelat dan angkur pada sisi lereng yang akan diperkuat. Karena pelat merupakan elemen struktural, maka memungkinkan terjadinya gesekan antara struktur dengan tanah. Oleh sebab itu, faktor *interface* juga harus diperhitungkan. Dalam pemodelan perkuatan lereng ini, besar faktor *interface* yang digunakan

adalah 1,00. Di samping itu, pemasangan pelat dilakukan dengan kemiringan lebih kurang 15° . Secara umum, tampilan pemodelan perkuatan lereng dengan pelat dan angkur dapat dilihat pada Gambar 8 sebagai berikut:



Gambar 8. Pemodelan *soil nailing*

Berdasarkan hasil *running*, lereng yang telah diperkuat memiliki faktor keamanan sebesar 2,044.

Secara keseluruhan, model perkuatan yang menghasilkan faktor keamanan tertinggi adalah metode *soil nailing*. Namun, metode ini kurang layak diterapkan pada lokasi dengan muka air yang tinggi. Hal ini disebabkan karena air menambah beban lereng. Selain itu, pemasangan *soil nailing* juga memberi beban tambahan kepada lereng sehingga meningkatkan deformasi pada lereng. Pemasangan *soil nailing* dengan kemiringan lebih kurang 15° terbukti dapat meningkatkan stabilitas lereng dengan asumsi lereng memiliki muka air tanah yang dalam.

E. Kesimpulan dan Saran

E.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemodelan lereng yang dilakukan memiliki nilai faktor keamanan sebesar 1,149 pada kondisi *existing* di lapangan.
2. Berdasarkan hasil analisis dengan *Shear Strength Reduction*, lereng tepat mengalami keruntuhan ($FK = 1$) bilamana nilai kohesi lapis atas, tengah

dan bawah masing-masing adalah 0,04 kN/m^2 , 31,2 kN/m^2 , dan 28,5 kN/m^2 . Sedangkan nilai sudut geser ketiga lapis tanah tersebut berturut-turut adalah $34,8^\circ$, $5,5^\circ$, dan $5,9^\circ$.

3. Analisis dengan muka air yang bervariasi menunjukkan bahwa peningkatan level muka air akan menurunkan faktor keamanan lereng. Faktor keamanan lereng paling rendah terjadi sewaktu muka air berada pada level yang setara dengan muka lereng dimana nilai faktor keamanan adalah 0,675.
4. Berdasarkan hasil analisis perkuatan lereng menggunakan tiga metode (gali timbun, terasering, dan struktur tambahan), metode gali timbun memberikan faktor keamanan sebesar 1,432 pada kondisi kering dan 0,84 pada kondisi basah. Perkuatan dengan membuat terasering memberikan nilai faktor keamanan sebesar 1,855 pada kondisi kering dan 1,148 pada kondisi basah. Perkuatan dengan pemodelan *soil nailing* memberikan nilai faktor keamanan sebesar 2,044 pada kondisi kering.

E.2 Saran

Saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Analisis mengenai deformasi lereng perlu dipertajam untuk memberikan hasil yang lebih mendetail terkait stabilitas lereng.
2. Analisis lereng tiga dimensi (3D) sebaiknya dikembangkan untuk memperoleh hasil analisis yang lebih akurat.
3. Pemodelan perkuatan lereng dengan konstruksi struktur tambahan dapat divariasikan lebih lanjut untuk mengidentifikasi jenis struktur terbaik yang dapat dibangun untuk memperkuat lereng.

Daftar Pustaka

- BNPB. (2017, December 12). *Diagram Bencana Alam di Indonesia*. Diambil kembali dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana : <https://bnpb.go.id>
- Das, B. M. (2008). *Advanced Soil Mechanics Third Edition*. New York: Taylor & Francis.
- Muntohar, M. (2006). *Tanah Longsor: Analisis - Prediksi - Mitigasi*. Yogyakarta: Geotechnical Engineering Research Group.
- Fawwaz Hanif, B. S. (2017). Analisis Perkuatan Soil Nailing Sebagai Metode Perbaikan Stabilitas Lereng. *E-Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 484-490.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah II*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Hardiyatmo, H. C. (2003). *Teknik Fondasi I*. Yogyakarta: Gadjah Mada Express.
- Hendra Riogilang, C. P. (2014). Soil Nailing dan Anchor Sebagai Solusi Aplikatif Penahan Tanah Untuk Potensi Longsor di STA 7+ 250 Ruas Jalan Manado - Tomohon. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 119-126.
- Ochiai, H. (2001). Landmarks in Earth Reinforcement. *International Symposium on Earth Reinforcement Journal*, 254-262.
- Prawiradisastra, S. (2008). Analisis Morfologi dan Geologi Bencana Tanah Longsor di Desa Ledoksari Kabupaten Karanganyar. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, 84-89.
- Rao, S. S. (2010). *The Finite Element Method in Engineering Fifth Edition*. Kidlington: Elsevier.
- Saurabh Rawat, A. G. (2016). Analysis of a Nailed Soil Slope Using Limit Equilibrium and Finite Element Methods. *International Journal Of Geosynthetic and Ground Engineering*, 1-23.
- Shong, L. S. (2005). Soil Nailing For Slope Strengthening. *Geotechnical Engineering Journal*, 1-9.
- Yacoub, T. (2016). Using Shear Strength Reduction Method for 2D and 3D Slope Stability Analysis. *Annual Kansas City Geotechnical Conference* (hal. 116-121). Kansas: Annual Kansas City Geotechnical Conference.
- Yanuar. (2004). *Analisa Stabilitas Lereng Dengan Menggunakan Program Elemen Hingga Plaxis*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.