BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Petea merupakan area konsesi PT Vale Indonesia Tbk, merupakan perusahaan tambang penghasil bijih nikel terbesar di Indonesia yang menerapkan sistem penambangan terbuka (*Surface Mining*) dengan menggunakan metode penambangan *Open Cast Mining.* Metode penambangan ini diterapkan untuk menambang endapan bijih nikel laterit yang dilakukan dengan cara memotong bagian sisi bukit dari puncak menuju ke bawah sesuai dengan garis konturnya. Endapan nikel laterit didominasi oleh tanah residual yang terbentuk melalui proses lateritisasi pelapukan batuan beku ultramafik. Pengupasan atau pemotongan tersebut akan membentuk jenjang-jenjang lereng.

Salah satu masalah yang umumnya dijumpai dalam operasi penambangan, terutama pada tambang terbuka adalah masalah stabilitas lereng. Perbedaan karakteristik dan pola penyebaran batuan, menyebabkan proses analisis kestabilan lereng harus disesuaikan dengan kondisi dan karakteristik batuan pada masing-masing lokasi penambangan. Kondisi lereng yang stabil tentunya dapat mendukung kelancaran aktivitas penambangan, namun sebaliknya kondisi lereng yang tidak stabil sangat berpotensi menyebabkan kelongsoran yang kemudian dapat menghambat aktivitas produksi serta membahayakan keselamatan pekerja. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk menganalisis

geometri lereng adalah dengan mengetahui Faktor Keamanan (*Safety Factor*), yang diperoleh melalui perbandingan antara besarnya gaya penahan dan gaya pendorong pada lereng batuan.

Faktor Keamanan (FK) didapatkan dengan cara menganalisis geometri lereng berdasarkan beberapa parameter geoteknik, diantaranya yaitu bobot isi (*unit weight*), kohesi, sudut gesek dalam (*phi*). Setiap parameter pada lapisan limonit dan saprolit tersebut dijumlahkan dan dirata-ratakan agar menghasilkan satu angka yang dapat merepresentasikan karakteristik data pada daerah tersebut. Kemudian, data tersebut digunakan pada tahap analisis melalui software Slide V6.0untuk mengetahui nilai FK (Faktor Keamanan) dari *Pit Design* yang telah dibuat sebelumnya.

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam melakukan studi kestabilan lereng ini, yaitu:

1. Bagaimana hasil analisis dari desain lereng yang telah dibuat oleh Tim *Mine Plan* berdasarkan nilai parameter geoteknik yang ada?
2. Bagaimana geometri lereng keseluruhan yang direkomendasikan pada area Pit B2C4?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari studi penelitian ini adalah :

1. Mengetahui hasil analisis kestabilan lereng pada geometri lereng awal yang diberikan oleh Tim *Mine Plan* PT Vale Indonesia Tbk.

2. Memberikan rekomendasi geometri lereng keseluruhan pada lereng PitB2C4 PT Vale Indonesia Tbk.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat dari studi penelitian ini adalah:

1. Memperluas wawasan peneliti tentang kajian geoteknik pertambangan dalam hal kestabilan lereng.
2. Memberikan rekomendasi desain lereng keseluruhan pada area Petea Pit B2C4yang optimal untuk diaplikasikan.

E. Batasan Masalah

Adapun beberapa batasan masalah dalam melakukan studi kestabilan lereng ini, yaitu :

1. Lokasi studi Penelitian dilakukan pada area Petea Pit B2C4 di PT Vale Indonesia Tbk.
2. Lapisan material terdiri dari *limonite*, *saprolite* dan *bedrock*.
3. Data *Physical and Mechanical Properties* tanah hasil analisis Laboratorium Fugro dianggap homogen dan mewakili satu area Petea.
4. Analisis sifat mekanik tanah *Consolidated Drained* dilakukan untuk mengetahui kondisi jangka panjang *Mine Plan* dengan mengasumsikan muka air tanah berada 5 meter di bawah permukaan tanah.
5. Analisis sifat mekanik tanah *Unconslidated Undrained* dilakukan untuk mengetahui kondisi jangka pendek *Mine Plan*.

6. Parameter masukan diolah menggunakan metode statistik dengan mengambil nilai tengah dari interval dengan frekuensi tertinggi pada histogram.
7. Faktor Gempa Bumi dimasukkan sebagai parameter untuk mengetahui kestabilan lereng.
8. Faktor ekonomi tidak dimasukkan sebagai pertimbangan dalam analisis.
9. Untuk studi analisis kestabilan lereng di Pit B2C4, maka dilakukan penarikan penampang melintang (*cross section*) menggunakan *software* Vulcan™ 7.5, yaitu pada cross *section* A – A', B – B', C – C', D – D',E – E', F – F',G – G', H – H', I – I',J – J', K – K' dan L – L'.
10. Analisis Kestabilan lereng dilakukan dengan menggunakan *software* SLOPE W

F. Sistematika Penulisan

Penulisan ini dilakukan secara sistematis yang dirangkum dalam beberapa bab sebagai berikut :

1. **BAB I. Pendahuluan** : Merupakan pendahuluan yang memberikan gambaran inti yang meliputi latar belakang, maksud dan tujuan, pokok bahasan dan batasan masalah, manfaat penulisan, dan sistematika penulisan.
2. **BAB II. Tinjauan Pustaka** : Tinjauan Pustaka yang berisikan teori-teori pendukung yang berhubungan dengan penelitian ini.

3. **BAB III. Metode Penelitian** : Metode Penelitian, menguraikan tentang metode-metode yang dilakukan serta konsep langkah penelitian pada penelitian ini.
4. **BAB IV. Hasil dan Pembahasan** : Analisa dan Pembahasan, menyajikan data-data yang diperoleh berupa data primer dan data sekunder yang kemudian diolah menjadi informasi yang dibutuhkan untuk menganalisis pokok permasalahan.
5. **BAB V. Penutup** : Berisi Kesimpulan dan Saran, merupakan bagian penutup dari tulisan ini. Berupa kesimpulan yang diperoleh dari hasil yang dicapai dan saran-saran yang berkaitan dengan pengembangan ilmu dari tulisan ini.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Lereng

Lereng adalah suatu permukaan tanah yang miring dan membentuk sudut tertentu terhadap suatu bidang horizontal dan tidak terlindungi (Braja M. Das, 1985). Lereng dapat terbagi menjadi dua kategori yaitu:

1. Lereng alami

Lereng alami merupakan lereng yang terbentuk secara alami akibat dari proses proses alam misalnya erosi. Lereng alam menurut keaktifannya dapat dibagi menjadi sebagai berikut:

a. Lereng aktif, yaitu lereng yang bergerak maupun yang tidak pada saat ini namun telah digerakkan oleh suatu siklus musiman sebelumnya.
b. Lereng tidak aktif, yaitu lereng yang tidak ditemukan adanya bukti telah terjadi pergerakkkan atau perpindahan dalam siklus musiman sebelumnya. Aktivitas lereng ini mungkin hanya terhenti sementara, namun memungkinkan terjadinya reaktivasi jika terdapat gangguan baik oleh alam maupun aktivitas manusia.

Beberapa penyebab terjadi nya suatu longsoran diakibatkan adanya penguatan tegangan geser (*Shear stress*) maupun pelemahan tegangan geser (*shear stress*) Pelemahan tegangan geser akan melemahkan permukaan lereng tersebut yang dapat disebabkan karena.

a. Erosi oleh aliran sungai, es, angin, pelapukan oleh udara, pengeringan dan pembekuan
b. Penurunan, longsoran batuan, runtuhan, *sliding* dan pendangkalan.
c. Fenomena yang berhubungan dengan aktifitas manusia seperti penambangan, penggalian terowongan atau perbuhan level muka air tanah (*water table*) pada daerah *toe*.

2. Lereng buatan

Lereng buatan adalah lereng yang dibuat oleh manusia untuk keperluan tertentu. Tanah asli dipotong dengan sudut lereng dan geometri tertentu yang memenuhi kebutuhan manusia. Misalnya untuk keperluan jalan tol, penambangan, dan lainnya. Lereng buatan dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu:

a. Lereng penggalian

Saluran pembuangan dan lereng jalan adalah contoh dari lereng penggalian. Beberapa faktor utama yang memengaruhi masalah stabilitas lereng penggalian adalah:

1) Morfologi tanah, seri stratigrafi mekanika tanah dan kondisi hidrogeologi.
2) Pemilihan metode pembuatan.
3) Karakteristik mekanik material.
4) Kontrol rembesan

Rancangan penggalian diperlukan untuk menentukan kemiringan lereng dan tinggi lereng agar tetap stabil sehingga tidak terjadi

longsor dan stabil. Selain itu dipertimbangkan juga faktor ekonominya. Parameter utama yang memengaruhi stabilitas lereng penggalian adalah sebagai berikut:

a) Permukaan batuan mengalami geseran dan deformasi.

b) Segi fisik dan geometri ketdiakmenerusan pada lereng.

c) Tinggi rata-rata, sudut lereng dan lebar geometri jenjang.

d) Ketidakmenerusan dan aliran pada massa tanah/batuan.

b. Lereng penimbunan

Tanggul, dam, jalan, dan *disposal* merupakan contoh contoh dari lereng penimbunan. Lereng penimbunan dibuat kohesif dan diperlukan pembangunan bertingkat dengan konsolidasi dan pengawasan tingkat beban untuk memperkuat pondasi tanah. Faktor utama yang memengaruhi masalah stabilitas lereng penimbunan antara lain:

1. Karakteristik mekanik material.
2. Pemilihan lokasi terkait masalah lingkungan.

B. Gerakan Tanah (*Mass Wasting*)

Gerakan tanah adalah pergerakan materi (batuan, tanah, dll) sepanjang dan searah dengan kemiringan lereng akibat gaya gravitasi. Gerakan tanah terjadi apabila gaya gravitas yang bekerja sejajar dengan kemiringan lereng melebihi kekuatan dari lereng tersebut (*slope failure*) (Sapiie, 2012). Faktor-faktor yang memengaruhi gerakkan tanah yaitu:

1. *Gradient* lereng
2. Pelapukan material pembentuk lereng

3. Kandungan air
4. Pembebanan
5. Tidak ada atau kurangnya vegetasi

C. Jenis – Jenis Longsor

1. Pengertian longsor

Longsor merupakan peristiwa perpindahan massa tanah atau batuan beserta massa lainnya yang terdapat didalamnya yang bergerak kebawah akibat adanya gaya gravitasi. Secara umum terdapat dua faktor utama yang bekerja pada bidang longsor yaitu faktor pendorong dan faktor penahan, apabila faktor pendorong lebih besar dari faktor penahan maka akan terjadi longsor. Terdapat enam jenis longsor yang dapat terjadi pada batuan atau tanah yaitu (Sapiie, 2012):

a. Longsoran Translasi

Massa tanah pada tipe longsoran translasi bergerak pada suatu bidang gelincir yang terbentuk merata ataupun menggelombang secara landai

b. Longsoran Rotasi

Massa tanah pada tipe longsoran rotasi bergerak pada suatu bidang gelincir yang berbentuk cekung sehingga seringkali terdapat perputaran atau rotasi dalam bidang gelincir tersebut. Jenis longsoran ini merupakan jenis yang sering terjadi didaerah tambang PT Vale Indonesia Tbk karena sebagian besar lereng merupakan tanah yang cenderung mudah lepas.

c. Pergerakan Blok

Jenis longsoran pergerakan blok seperti longsoran translasi yang bergerak pada bidang gelincir yang cenderung mendatar. Namun, pada pergerakan blok massa yang bergerak merupakan massa blok batu yang biasanya dalam ukuran yang besar. Sehingga sangat berbahaya bagi manusia yang tinggal disekitarnya apabila terkena longsoran seperti ini.

d. Runtuhan Batu

Jenis longsoran ini adalah ketika suatu massa batu terlepas dan jatuh bebas kebawah. Longsoran ini biasa terjadi pada bukit terjal dengan lereng yang cukup curam dan menggantung, seringkali ditemukan pada tebing pantai.

e. Rayapan Tanah

Jenis longsoran ini biasanya tidak terlihat karena massa tanah bergerak secara perlahan dan tidak terdeteksi. Namun pada waktu yang cukup lama akan merusak karena infrastruktur diatasnya akan terus bergeser dan menjadi miring ke bawah.

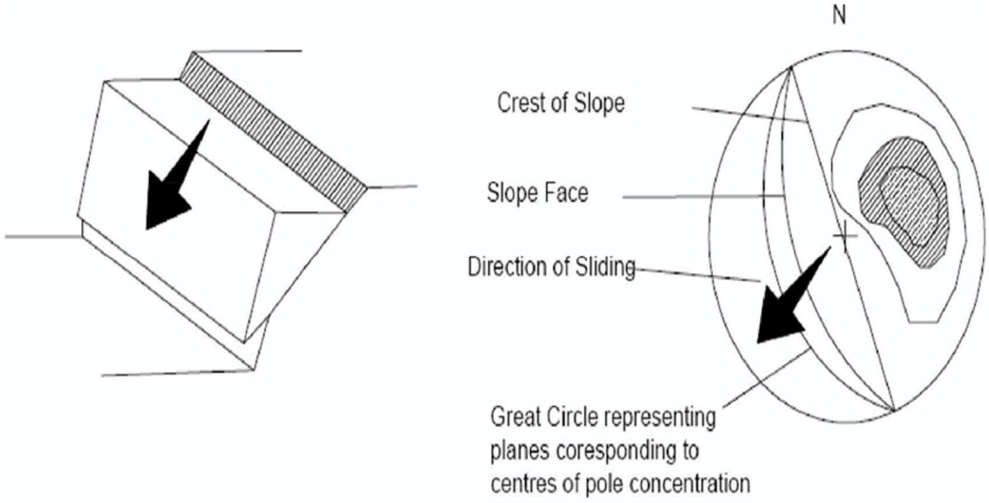
f. Aliran Bahan Rombakan

Jenis tanah longsor ini terjadi ketika massa tanah bergerak didorong oleh air. Kecepatan aliran tergantung pada kemiringan lereng, volume, tekanan air dan jenis materialnya. Gerakannya sepanjang lembah dan mampu mencapai ratusan meter jauhnya.

i. Jenis – jenis longsoran pada lereng

Jenis-jenis longsoran yang umumnya terjadi pada lereng batuan dan tanah adalah longsoran bidang (*Plane Failure*), longsoran baji (*Wedge Failure*), longsoran guling (*Toppling Failure*), dan longsoran busur (*Circular Failure*).

a. Longsoran Bidang (*Plane Failure*)



Gambar 1. Ilustrasi longsoran bidang

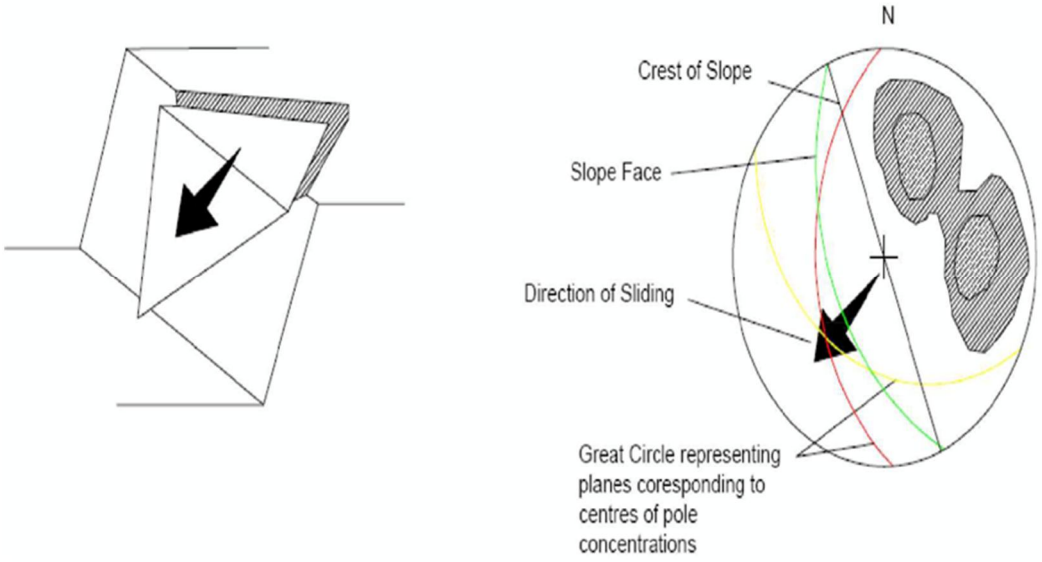
Longsoran bidang merupakan longsoran akibat adanya struktur geoogi yang berkembang pada tubuh batuan atau tanah seperti kekar (*joint*) maupun sesar. Longsoran ini dapat terjadi apabila memenuhi kondisi kondisi berikut:

1) Jurus (*strike*) bidang luncur mendekati paralel terhadap jurus bidang permukaan lereng.
2) Kemiringan bidang luncur harus lebih kecil dari pada kemiringan bidang permukaan lereng.

3) Kemiringan bidang luncur yang lebih besar daripada sudut gesek dalam (*internal friction*).

4) Terdapat bidang bebas yang merupakan batas lateral dari massa batuan atau tanah yang longsor.

b. Longsoran Baji (*Wedge Failure*)

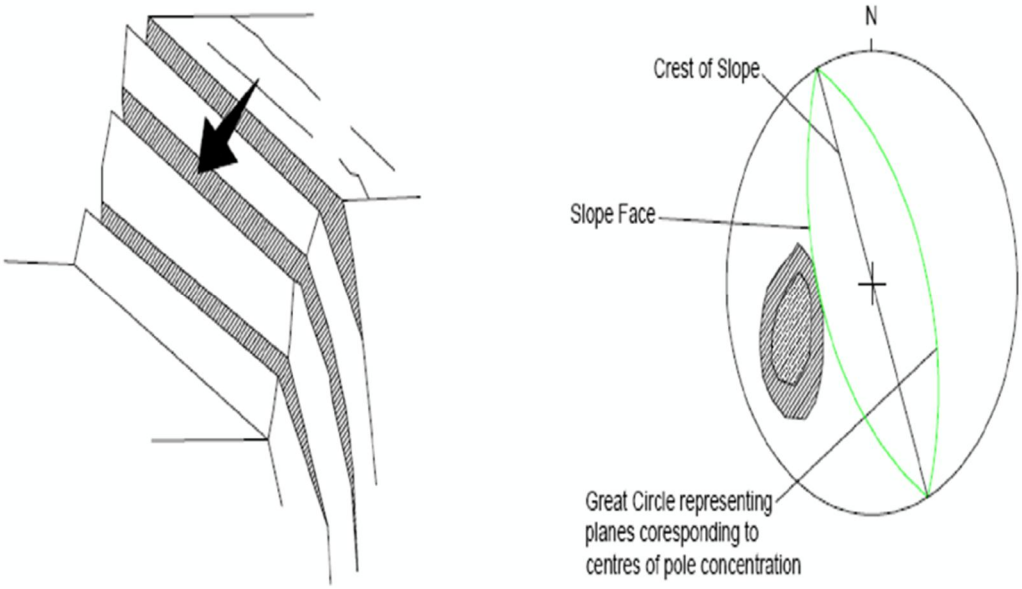


Gambar 2. Ilustrasi longsoran baji

Longsoran baji dapat terjadi apabila dua bidang lemah bertemu/berpotongan sehingga lereng membentuk baji. Longsoran baji dapat dibedakan menjadi dua tipe longsoran yaitu longsoran tunggal (*single sliding*) dan longsoran ganda (*double sliding*). Pada longsoran tunggal, longsoran terjadi pada salah satu bidang, sedangkan pada longsoran ganda, longsoran terjadi pada kedua bidang lemah. Longsoran baji tersebut akan terjadi apabila memenuhi syarat sebagai berikut:

1) Kemiringan lereng lebih besar daripada kemiringan garis potong kedua bidang lemah
2) Sudut garis potong kedua bidang lemah lebih besar daripada sudut geser dalamnya

c. Longsoran Guling (*Toppling Failure*)

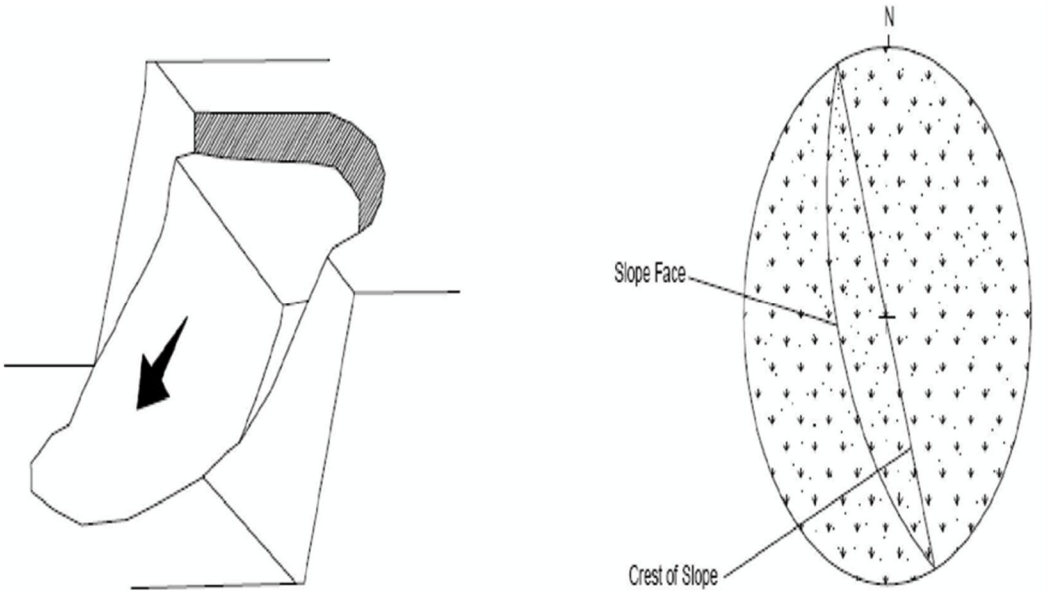


Gambar 3. Ilustrasi longsoran guling

Longsoran ini terjadi pada lereng yang terjal dan batuan yang keras, struktur bidang lemahnya berbentuk kolom-kolom. Longsoran terjadi apabila bidang bidang lemah berawalan arah dengan kemiringan lereng. Syarat terjadinya longsoran guling ini adalah:

1) $\beta > 90^o + \phi - \alpha$, di mana β = kemiringan bidang lemah, ϕ = sudut geser dalam dan α = kemiringan lereng.
2) Perbedaan maksimal jurus (*strike*) dari kekar (*joint*) dengan jurus lereng (*slope*) adalah 30^o.

d. Longsoran Busur (*Circular Failure*)



Gambar 4. Ilustrasi longsoran busur

Longsoran busur umumnya terjadi pada material yang bersifat lepas (*loose material*) seperti material tanah. Sesuai dengan namanya, bidang longsorannya berbentuk busur. Batuan hancur yang terdapat pada suatu daerah penimbunan dengan dimensi besar akan cenderung longsor dalam bentuk busur lingkaran (Hoek & Bray, 1981).

Pada jenis longsoran ini, struktur geologi belum diketahui berpengaruh pada kestabilan lereng di Petea. Perhitungan kestabilan lereng dalam studi ini hanya memasukan parameter nilai kohesi, berat jenis, sudut gesek dalam, geometri lereng dan kondisi air tanah.

D. Parameter Geoteknik Tanah

Untuk menganalisis kestabilan lereng pada tanah, dibutuhkan beberapa parameter yang terbagi menjadi sifat fisik dan sifat mekanik.

1. Sifat fisik

Sifat fisik tanah terdiri atas porositas, bobot isi, *specific gravity*, absorpsi dan *void ratio.*

a. Porositas (n), adalah perbandingan volume rongga dengan volume total. Nilai porositas dinyatakan dalam persentase (%) atau desimal.

$$n = \frac{Vv}{V} \quad \text{..... (1)}$$

b. Bobot isi (γ), adalah perbandingan antara berat butiran dengan volume total.

$$\gamma = \frac{Ws}{Vt} \quad \text{..... (2)}$$

c. Angka pori (e), adalah perbandingan volume kosong dengan dengan volume butiran. Dinyatakan dalam persentase (%) atau desimal.

$$e = \frac{Vv}{Vs} \quad \text{..... (3)}$$

d. Berat volume basah (γ_b), adalah perbandingan antara berat butiran tanah termasuk air dan udara, dengan volume total tanah.

$$\gamma b = \frac{Wa}{VT} \quad \text{..... (4)}$$

e. Berat volume kering/padat (γ_s), adalah perbandingan antara berat butiran padat dengan volume butiran padat.

$$\gamma s = \frac{Ws}{Vs} \quad \text{..... (5)}$$

f. Berat spesifik atau *specific gravity* tanah (Gs), adalah perbandingan antara berat volume butiran padat dengan berat volume *void*.

$$Gs = \frac{\gamma s}{\gamma w} \quad \text{..... (6)}$$

2. Sifat mekanik

Sifat mekanik atau kuat geser tanah adalah gaya yang dihasilkan oleh interaksi antar butir tanah yang melawan desakkan atau tarikan yang dialami. Kuat geser tanah ini bergantung kepada nilai kohesi dan sudut gesek dalam. Kegagalan pada lereng (longsor) terjadi akibat ketika terjadi tegangan antar butir terdapat pergerakan atau pergeseran dalam butir tanah sehingga tubuh tanah secara keseluruhan bergeser meluncur satu sama lain.

a. Kohesi

Menurut Blasio (2011), kohesi tanah merupakan besarnya gaya resistensi/perlawanan tanah per satuan luas dan dapat dinyatakan dalam satuan Pascal (Pa). Pada tanah alami, kohesi terjadi karena adanya gaya elektrostatik antara partikel lempung dan lanau. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa tanah tanpa kandungan lempung dan lenau merupakan tanah yang tidak kohesif.

b. Sudut Gesek Dalam (*Angle of Internal Friction*)

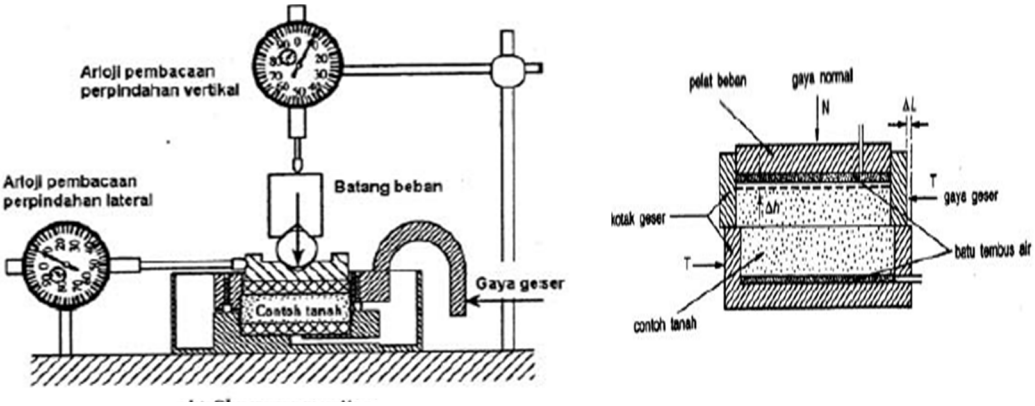
Sudut gesek dalam tanah merupakan ukuran kekuatan geser tanah untuk menahan gaya yang menyebabkan pergeseran. Pada grafik Mohr Coulomb, sudut geser dalam merupakan sudut yang terbentuk antara tegangan normal dengan tegangan geser.

3. Uji parameter geoteknik tanah

Parameter kuat geser tanah ditentukan dengan uji laboratorium terhadap sampel tanah asli *(undisturbed).* Terdapat beberapa cara yang digunakan menentukan kuat geser tanah diantaranya adalah:

a. Uji kuat geser langsung *(direct shear test)*

Pada pengujian geser langsung, tegangan normal (N) pada benda uji diberikan dari atas kotak geser. Gaya geser diterapkan pada setengah bagian kotak geser. Selama pengujian perpindahan (ΔL) akibat gaya geser dan perubahan tebal (Δh) benda uji dicatat. Pada tanah pasir bersih yang padat, tahanan geser bertambah sampai beban puncak, dimana keruntuhan geser terjadi, sesudah itu kondisi menurun dengan penambahan penggeseran dan akhirnya konstan, kondisi ini disebut kuat geser residu. Sudut gesek dalam padat (øm) dalam kondisi padat diperoleh dari tegangan puncak, sedang sudut gesek dalam kondisi longgar (øt) diperoleh dari tegangan batas / residu (Herman, 2010).



Gambar 5. Skema pengujian kuat geser langsung (Herman, 2010)

b. Uji Triaksial

Pada uji triaksial, sampel berselubung karet dimasukan dalam tabung kaca, ruang dalam tabung kaca diisi air, benda uji ditekan dengan tekanan sel (σ3) yang berasal dari tekanan cairan dalam tabung. Untuk menghasilkan kegagalan geser pada benda uji, tekanan aksial dikerjakan melalui bagian atas benda uji sampai benda uji runtuh. Besarnya tekanan aksial yang diberikan dicatat (Δσ).

Tegangan Δσ = σ1 – σ3 disebut tegangan deviatorik. Regangan aksial diukur selama penerapan tegangan deviator. Akibat penambahan regangan akan menambah penampang melintang benda uji. Jika penampang benda uji awal Ao, maka luas penampang benda uji A pada regangan tertentu adalah:

$$A = A_0 \frac{1-\frac{\Delta V}{V_0}}{1-\frac{\Delta L}{L_0}} \quad \text{..... (7)}$$

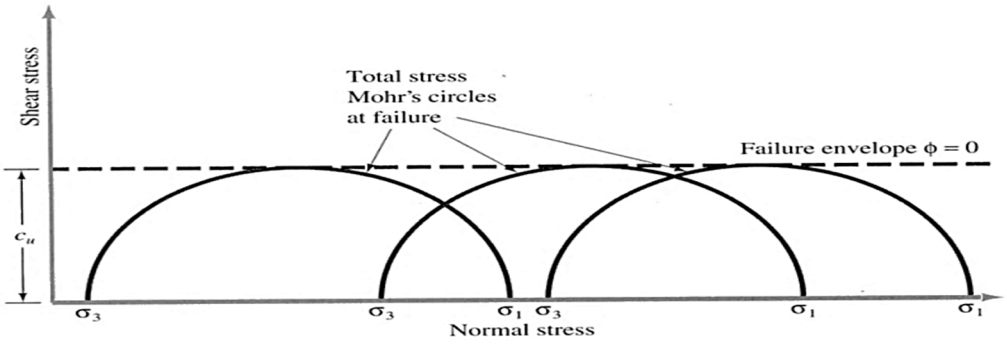
Uji triaksial dapat dilakukan melalui tiga cara, yakni:

1) *Unconsolidated Undrained* (UU)

Merupakan uji cepat (*quick-test*), mula-mula sample diberi tegangan kekang (σ3), kemudian diberi tegangan normal melalui tegangan deviator (Δσ) sampai terjadi keruntuhan. Selama pengujian air tidak diizinkan keluar dari benda uji (katup drainase ditutup). akibatnya beban normal tidak ditransfer kebutiran tanah dan terjadi kelebihan tekanan air pori.

Nilai kuat geser yang rendah terjadi pada uji (UU), tanah lempung jenuh air nilai sudut gesek dalam (ø) nol, sehingga yang ada hanya

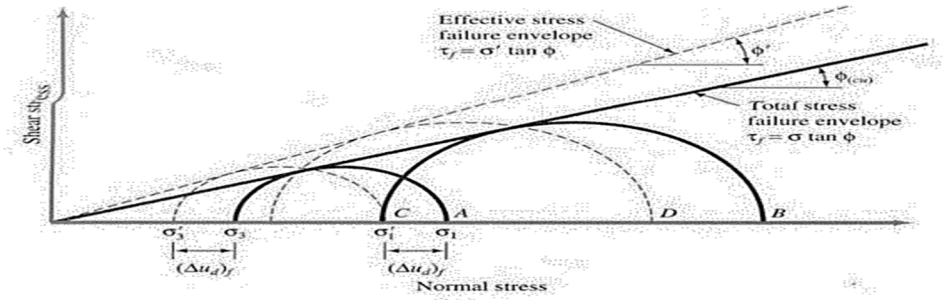
nilai c. Kondisi undrained dapat dilakukan dengan pengujian cepat pada tanah permeabilitas rendah (Herman, 2010).



Gambar 6. Grafik hasil uji *unconsolidated undrained* (Das, 2002)

2) *Consolidated Undrained* (CU)

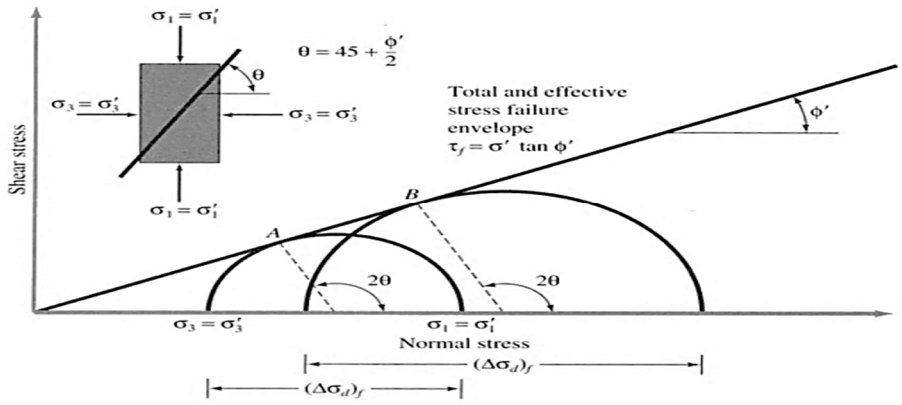
Pada pengujian ini, benda uji dibebani dengan tekanan sel dengan mengizinkan air keluar dari benda uji sampai selesai. Sesudah itu tegangan deviator diterapkan dengan katup drainase tertutup sampai benda uji runtuh. Karena katup tertutup maka tidak terjadi perubahan volume dan terjadi kelebihan tekanan air pori dapat diukur selama pengujian berlangsung (Herman, 2010).



Gambar 7. Grafik hasil uji *consolidated undrained* (Das, 2002)

3) *Consolidated drained* (CD)

Pada pengujian ini mula-mula tekanan sel diterapkan pada benda uji dengan katup terbuka sampai konsolidasi selesai. Sesudah itu dengan katup tetap terbuka, tegangan diviator diterapkan dengan kecepatan rendah sampai runtuh (kecepatan yang rendah agar tekanan air pori nol selama pengujian). Pada kondisi ini seluruh tekanan pengujian ditahan oleh gesekan antar butiran tanah (Herman, 2010).



Gambar 8. Grafik hasil uji *consolidated drained* (Das, 2002)

E. Stabilitas Lereng

Apabila suatu permukaan bumi membentuk suatu kemiringan dengan sudut tertentu dengan bidang horizontal akan membentuk morfologi lereng, lereng tersebut harus dianalisis kestabilannya apakah stabil (tidak akan longsor) atau tidak stabil (berpotensi longsor). Komponen massa yang berada pada bidang miring akan terkena gaya gravitasi yang mendorong kearah bawah, dan semakin besar sudut lereng maka semakin besar pula gaya pendorongnya.

Ketika gaya pendorong lebih besar dari gaya penahan, maka lereng tersebut akan mengalami kelongsoran. Keadaan ini dapat dicegah dengan menghitung dan mengestimasi seberapa besar gaya penahan yang dibutuhkan untuk menahan gaya pendorong yang ada, atau seberapa besar gaya pendorong yang dapat diterima oleh gaya penahan yang ada. Sehingga kelongsoran dapat diminimalisir dan mencegah terjadinya kerugian yang lebih besar.

1. Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng

Terdapat faktor faktor tertentu yang perlu diperhatikan untuk menjaga kestabilan suatu lereng. Menurut Purwanto (2002), terdapat tujuh faktor utama yang menjadi fokus utama dalam kestabilan lereng, yaitu:

a. Penyebaran Batuan

Penyebaran batuan dan tanah pada daerah penelitian haruslah diperhatikan terlebih dahulu. Jenis batuan dan tanah dan keterdapatannya penting untuk diidentifikasi karena akan dibutuhkan untuk mendapatkan sifat fisik dan mekanik yang akan digunakan untuk analisis kestabilan lereng.

b. Relief Permukaan Bumi

Morfologi permukaan bumi juga penting untuk diperhatikan karena dengan mengetahui morfologi permukaan bumi maka dapat ditemukan area tertentu yang memiliki tingkat erosi tinggi yang memungkinkan untuk ditemukannya singkapan singkapan juga pelapukan yang relatif lebih cepat sehingga lebih banyak ditemukannya zona laterit.

c. Geometri Lereng

Geometri lereng mencakup seluruh aspek yang berhubungan dengan kenampakan visual lereng, yaitu:

1) Orientasi lereng, menentukan tipe longsoran yang mungkin terjadi.
2) Kemiringan lereng, secara umum suatu lereng memiliki keimiringan yang tetap, maka penambahan tinggi lereng akan mengakibatkan penurunan stabilitas lereng yang bersangkutan karena berat lereng yang harus ditahan oleh kekuatan geser tanah semakin besar.
3) Tinggi lereng, sehubungan dengan kemiringan, penambahan tinggi lereng memerlukan kemiringan lereng yang lebih kecul untuk menjaga agar lereng tetap stabil.
4) Lebar jenjang (*bench*), akan menentukan besarnya sudut kemiringan lereng pada saat analisis stabilitas untuk lereng keseluruhan. Semakin besar lebar jenjang, maka semakin kecil sudut lereng keseluruhan.

d. Struktur Geologi

Struktur geologi seperti kekar (*joint*), sesar (*fault*), maupun lipatan (*fold*) sangat memengaruhi. Selain struktur geologi, bidang perlapisan juga sangat berpengaruh karena dapat menjadi bidang luncur dari suatu longsoran. Struktur geologi sangat berperan penting karena merupakan bidang bidang lemah yang dapat menurunkan stabilitas

lereng tersebut juga dapat menjadi tempat yang berpotensi mengalami rembesan air yang akan melemahkan tubuh batuan secara keseluruhan. Orientasi dan bidang lemah tersebut terhadap bidang perlapisan pun sangat penting untuk diperhatikan karena apabila searah maka akan meningkatkan kemungkinan terjadinya longsor pada bidang gelincir tersebut.

e. Kondisi Air Tanah

Air tanah pada tanah atau batuan dapat mengurangi stabilitas tanah karena air tanah akan mengurangi ikatan antar butir sehingga akan meningkatkan kemungkinan terjadinya pergerakan dari tanah itu sendiri. Adanya air tanah akan menambah beban tubuh batuan atau tanah secara keseluruhan. Tanah yang mengandung air akan lebih lemah dibanding yang tidak mengandung air untuk geometri yang sama. Air yang melalui rekahan pun akan menyebabkan pelapukan yang lebih cepat. Meningkatnya air tanah akan meningkatkan tekanan pori air sehingga tegangan efektif akan berkurang dan memperbesar kemungkinan tanah untuk longsor.

f. Gaya – gaya Dari Luar

Gaya-gaya ini berasal dari luar yang dapat memengaruhi kestabilan lereng keseluruhan yang umumnya disebabkan oleh:

1) Gempa dan Peledakan

Gempa dan peledakan menghasilkan gelombang getaran yang memberikan gaya pada lereng yang akan mengganggu stabilitas

lereng. Gaya yang dihasilkan akan bergerak melalui tubuh lereng dan apabila batas plastisitas terlampaui, maka lereng tersebut akan menjadi lemah dan dapat menghasilkan longsoran.

2) Alat Berat

Alat berat yang berada pada lereng menambah beban terhadap lereng yang akan menghasilkan getaran dan juga meningkatkan tekanan air pori sehingga tegangan efektif berkurang dan lereng menjadi lemah.

g. Iklim

Iklim memiliki peran yang sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap temperatur dan kelembapan. Perubahan temperatur yang intensif dan udara yang lembap akan mempercepat proses pelapukan batuan. Oleh sebab itu daerah tropis memiliki singkapan batuan yang sangat lapuk dan tidak segar seperti di daerah beriklim dingin dan kering.

2. Teori stabilitas lereng

Kondisi lereng yang ada dipengaruhi oleh banyak parameter untuk menentukan seberapa besar faktor penahannya. Selain itu juga nilai parameter itu memiliki ketidakpastian yang cukup besar. Sehingga diperlukan adanya penyederhanaan dengan memberikan berbagai asumsi dari awal.

Tingkat kestabilan lereng direpresentasikan oleh suatu nilai faktor keamanan (FK). Faktor keamanan merupakan perbandingan dari jumlah

gaya gaya penahan dibagi dengan jumlah gaya gaya pendorong. Kondisi lereng dinyatakan stabil apabila memiliki nilai FK > 1, namun perlu diperhatikan bahwa nilai itu didapatkan dengan banyak asumsi dan ketidakpastian nilai sehingga nilai faktor keamanan yang digunakan secara aktual jangan disamakan dengan nilai teoritis.

Nilai faktor keamanan untuk stabilitas lereng secara teoritis merupakan perbandingan antara gaya penahan dan gaya pendorong. Sehingga akan stabil ketika gaya penahan sama atau lebih dari gaya pendorong dengan rincian sebagai berikut:

Stabil : FK > 1,00

Kritis : FK = 1,00

Labil : FK < 1,00

Sedangkan Bowles, 1989 membagi faktor keamanan berdasarkan frekuensi terjadi nya longsor sebagai berikut :

Stabil : FK > 1,25

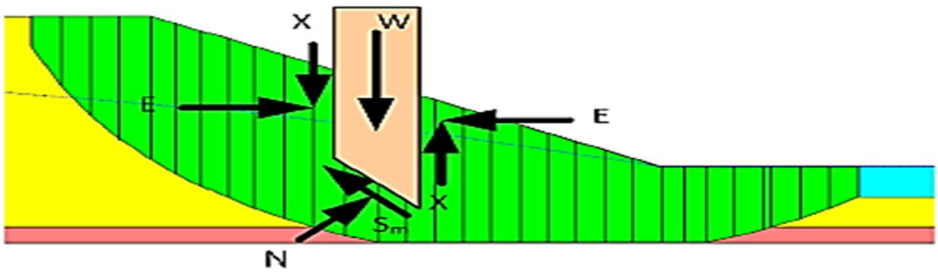
Kritis : 1,07 < FK < 1,25

Labil : FK < 1,07

3. Analisis stabilitas lereng

Metode Limit equilibrium merupakan metode yang sangat popular digunakan oleh para engineer geolteknik untuk menganalisis stabilitas lereng sejak beberapa dekade yang lalu hingga saat ini (GEO-SLOPE International Ltd, 2015). Keunggulan metode ini ada lah dapat digunakan untuk memecahkan masalah stabilitas lereng dengan struktur geometri

yang kompleks. Untuk menghitung factor keamanan, dalam metode limit equilibrium membagi masa lereng yang terletak diatas bidang gelincir menjadi beberapa *slice.*



Gambar 9. Ilustrasi gaya gaya yang bekerja pada

Dalam penelitian ini perhitungan angka factor keamanan dilakukan dengan menggunakan metode Morgenstern & Price. Pada metode Morgenstern & Price (1965), perhitungan nilai factor keamanan selalu memperhatikan moment dan gaya yang bekerja pada semua slice.

Menurut Morgenstern and Price (1965), gaya gesek interslice dihitung sebagai persentasi dari gaya normal interslice berdasarkan rumus empiris berikut:

$$X = E.\lambda.f(x) \quad \text{..... (8)}$$

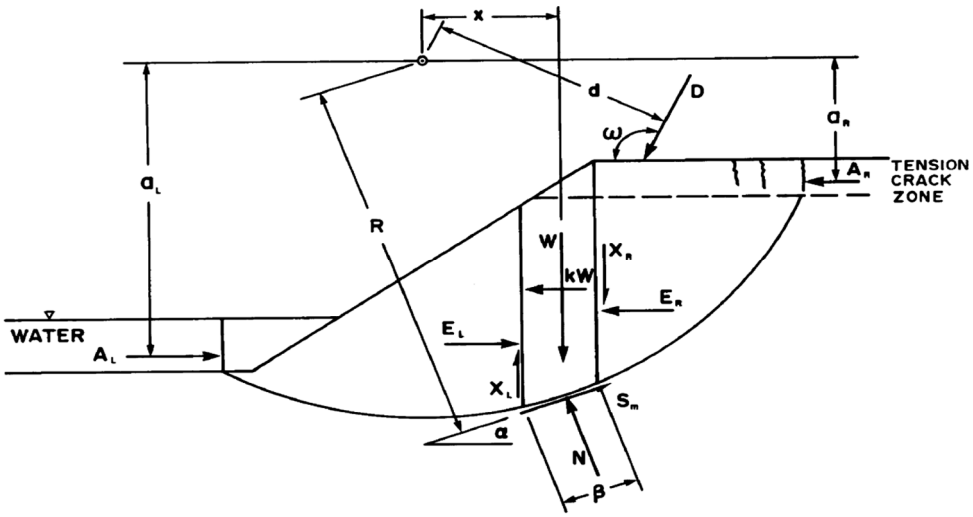
Keterangan:

F(x) merupakan fungsi gaya interslice

E = gaya normal interslice

λ =persentasi dari fungsi yang digunakan

X = gaya geser interslice



Gambar 10. Ilustrasi gaya gaya yang bekerja pada sebuah *slice* dalam sebuah bidang gelincir (GEO-SLOPE International Ltd.,

Nilai faktor keamanan berdasarkan moment dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F = \frac{\sum\left(\beta c' R + \left[N - u_w \beta \frac{tan\emptyset^b}{tan\emptyset'} - u_a \beta \left(1 - \frac{tan\emptyset^b}{tan\emptyset'}\right)\right] R tan\emptyset'\right)}{\sum Wx - \sum Nf + \sum Dd \pm \sum Aa} \quad \text{..... (9)}$$

Jumlah gaya yang bekerja pada arah horizontal dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sum(X_L - X_R) - \sum(N \sin\alpha) + \sum(S_m \cos\alpha) - \sum kW + \sum D \cos\bar{\omega} + \sum A = 0 \text{.. (10)}$$

Nilai faktor keamanan lereng berdasarkan kesetimbangan gaya horizontal dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F = \frac{\sum\left(c'\beta cos\alpha + \left[N - u_w \beta \frac{tan\emptyset^b}{tan\emptyset'} - u_a \beta \left(1 - \frac{tan\emptyset^b}{tan\emptyset'}\right)\right] tan\emptyset' cos\alpha\right)}{\sum N \sin\alpha + \sum kW - \sum D \cos\alpha \pm \sum A} \quad \text{..... (11)}$$

Dengan gaya mormal (N) pada dasar slice ditentukan berdasarkan jumlah gaya pada arah vertical pada setiap slice, seperti pada rumus berikut:

$$(X_L - X_R) - W + N\cos\alpha + S_m \sin\alpha - D\sin\bar{\omega} = 0 \text{ ..... (12)}$$

Keterangan:

β = panjang garis dasar setiap slice

F = Faktor keamanan

c' = Kohesi efektif

$\emptyset'$ = sudut geser dalam efektif

σ_n = tegangan normal total

u_a = tegangan udarah pori

u_w = tegangan air pori

$\emptyset^b$ = sudut yang mendefenisikan peningkatan kekuatan geser setiap peningkatan *suction*

α = sudut antara garus singgung pusat pada daar slice dengan garis horizontal

W = berat total sebuah slice dengan lebar d dan tinggi h

N = gaya normal total pada dasar slice

Sm= gaya geser pendorong yang bekerja pada dasar slice

D = external line load

R = radius bidang gelincir sirkular

x = jarak horizontal dari garis pusat setiap slice ke pusat moment

e = jarak vertical dari pusat setiap slice ke pusat moment

A = resultan water force external

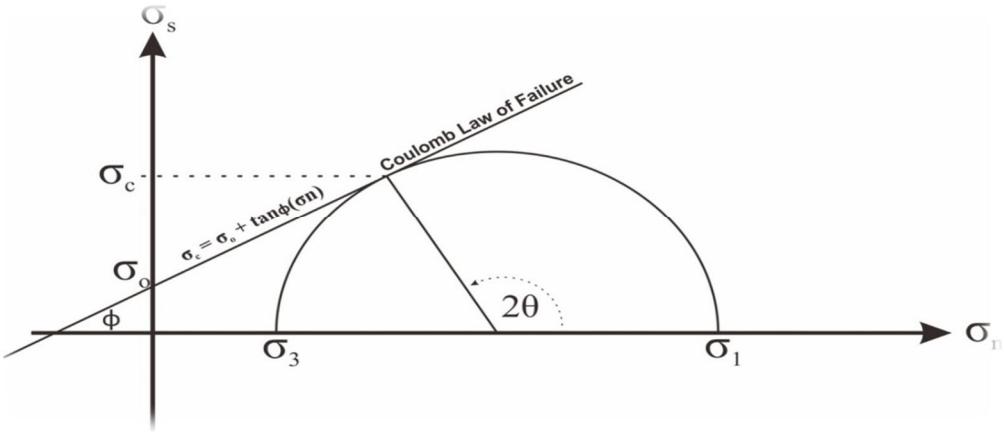
Dalam melakukan analisis terhadap kestabilan lereng tambang, perlu dilakukan penyelidikan lapangan terlebih dahulu untuk mencari dan

mengumpulkan data-data yang dibutuhkan dalam proses analisis yang akan dilakuakan. Dalam penyelidikan tersebut juga harus dilakukan investigasi lapangan untuk memperkirakan dan mengevaluasi potensi-potensi bahaya pada lereng.

4. Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb

Teori yang digunakan untuk menguji hubungan antara tegangan normal (*normal stress*) dan tegangan geser (*shear stress*) pada tanah maupun batuan adalah dengan menggunakan teori keruntuhan Mohr-Coulomb. Teori ini menyatakan bahwa suatu massa batuan atau tanah akan mengalami keruntuhan apabila besar tegangan normal efektif dan tegangan geser efektif berada pada nilai kritis sesuai kriteria mohr-coulomb. Tegangan utama dinotasikan menggunakan simbol σ. Tegangan utama maksimum dinotasikan sebagai σ1 dan tegangan utama minimum dinotasikan sebagai σ3.

Pada suatu uji material menggunakan pengujian Triaksial, akan didapatkan lingkaran lingkaran Mohr dan hubungan titik dari lingkaran tersebut akan menghasilkan garis selubuh keruntuhan Coulomb (Coulomb Law of Failure). Garis selubung keruntuhan ini akan menjadi suatu garis linier dengan suatu persamaan sebagai berikut.



Gambar 11. Diagram Mohr

$$\sigma_c = \sigma_o + \tan\phi(\sigma_n) \quad \text{..... (13)}$$

σ_c = Tegangan geser kritis

σ_o = Kohesi

σ_n = Tegangan normal pada bidang runtuh

ϕ = Sudut gesek dalam

Pada kondisi di alam, persamaan yang digunakan pada Mohr-Coulomb merupakan tegangan efektif yang memperhitungkan tegangan pori sesuai dengan persamaan Terzaghi sebagai berikut:

$$\Sigma = \sigma' + p \quad \text{..... (14)}$$

σ = *Total Stress*

σ' = *Effective Stress*

p = *Pore Pressure*

Sehingga persamaan (Coulomb,1776dalam Zang, 2012) yang sudah memperhitungkan tekanan pori akan menggunakan tegangan efektif menjadi seperti berikut:

$$\Sigma_c = \sigma_o + \tan\phi(\sigma_n - p) \quad \text{..... (15)}$$

σ_c = Tegangan geser kritis

σ_o = Kohesi

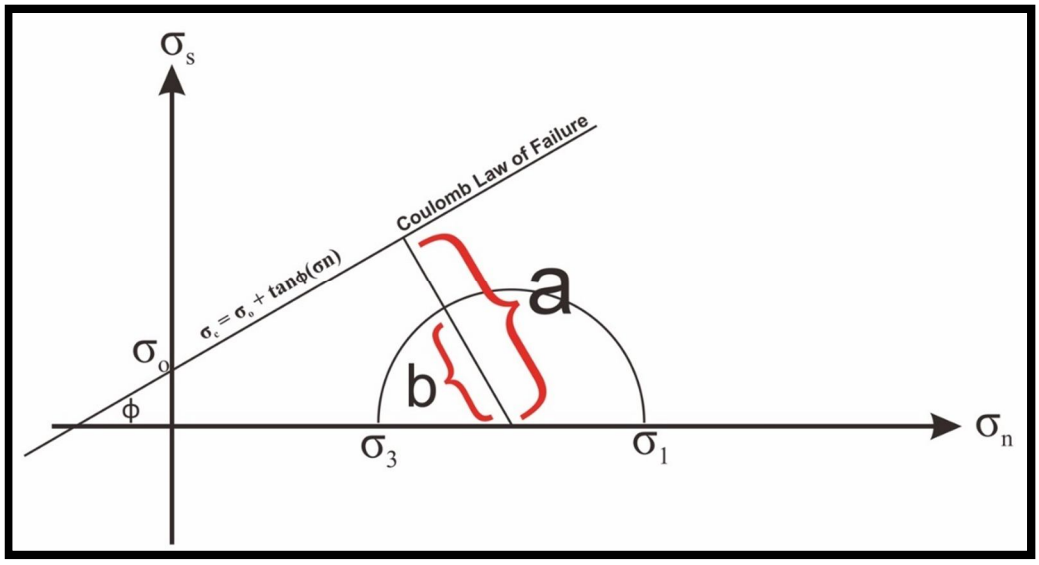
σ_n = Tegangan normal pada bidang runtuh

ϕ = Sudut gesek dalam

p = *Pore pressure*

Persamaan ini menunjukan bahwa semakin besar tekanan pori air maka akan semakin kecil tegangan geser kritisnya menyebabkan massa tanah atau batuan lebih mudah mengalami keruntuhan.

Faktor keamanan dapat ditentukan berdasarkan diagram mohr diatas dengan mengukur jarak dari titik pusat lingkaran ke garis *Coulomb Envelope* dibagi dengan jari jari lingkaran.



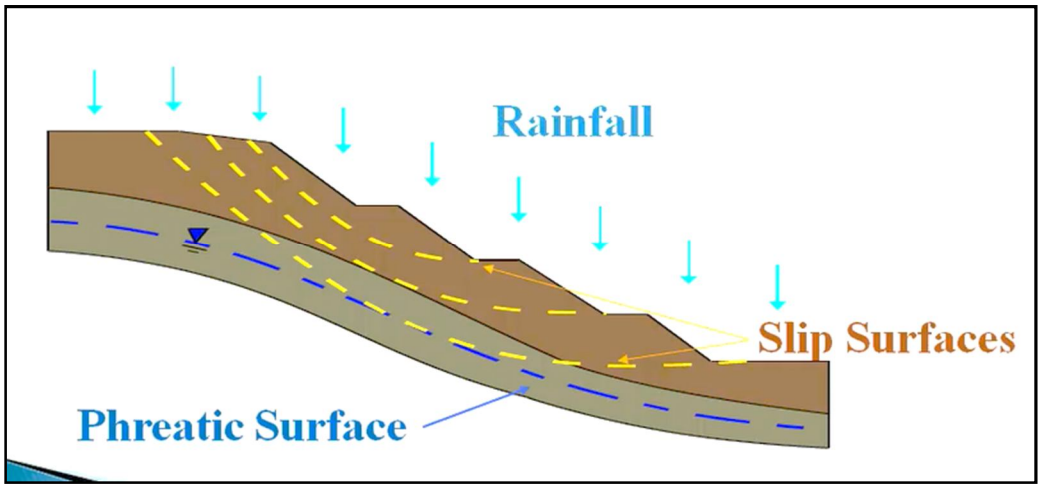
Gambar 12. Diagram Mohr untuk mencari faktor keamanan

$$FK = \frac{a}{b} = \frac{\left[\frac{\sigma c}{\tan \emptyset} + \frac{\sigma 1 + \sigma 3}{2}\right] \sin \emptyset}{\frac{\sigma 1 - \sigma 3}{2}} \quad \text{..... (16)}$$

F. Pengaruh Air Tanah Terhadap Stabilitas Lereng

Salah satu faktor yang memiliki pengaruh besar terhadap kestabilan lereng adalah air tanah. Air tanah dipengaruhi oleh keadaan iklim sekitar, ketika curah hujan tinggi maka akan meningkatkan muka air tanah, sehingga derajat kejenuhan juga meningkat. Kehadiran air tanah akan mengurangi kekuatan tanah secara sifat fisik dan sifat mekaniknya. Pengaruh utama air tanah adalah akan meningkatkan tegangan pori yang mengurangi tegangan efektif seperti rumus di atas sesuai persamaan Terzaghi(1925). Berkurangnya tegangan efektif akan secara langsung melemahkan massa tanah.

Tinggi muka air tanah pada suatu tempat dapat dipengaruhi oleh curah hujan, topografi, letak sungai atau danau disekitarnya dan karakteristik geohidrologi massa batuan yang ada.



Gambar 13. Ilustrasi keberadaan air tanah pada lereng penambangan (Krahn, 2014)

Menurut Hardiyatmo (2006), tanah terbagi menjadi dua zona yaitu zona tekanan pori positif dan tekanan pori negatif. Garis yang membagi kedua zona adalah garis permukaan air tanah, dimana tekanan hidrostatiknya sama dengan tekanan atmosfer. Dibawah muka air tanah, tanah dalam kondisi jenuh air dan tekanan air pori adalah positif. Di atas muka air tanah, di dalam zona tanah tidak jenuh, nilai tekanan pori adalah negatif.

1. Tekanan air pori positif

Pada permukaan freatis, tekanan air pori sama dengan tekanan atmosfer, sedangkan dibawah permukaan freatis tekanan air pori lebih besar daripada tekanan atmosfer.Dalam tinjauan tegangan efektif, kuat geser tanah dinyatakan dalam persamaan coulomb dibawah ini:

$$\sigma_c=\sigma_o +\tan\phi(\sigma_n-p) \quad (17)$$

$$\sigma = \sigma' + p \quad (18)$$

keterangan :

σ_c = Tegangan geser kritis

σ_o = Kohesi

σ_n = Tegangan normal pada bidang runtuh

σ' = Tegangan efektif

p = Tekanan air pori

ϕ = Sudut gesek dalam

Kenaikan tekanan air pori lebih cepat terjadi pada periode hujan lebat (terus menerus). Meningkatnya tekanan air pori dapat menyebabkan berkurangnya tegangan normal efektif dalam tanah yang diakibatkan

karena berkurangnya kuat geser tanah. Keadaan ini dapat memicu terjadinya ketidakstabilan lereng dan jika dibiarkan akan menjadi penyebab terjadinya longsoran. Kecepatan bertambahnya tekanan air pori bergantung pada banyak 34egati, seperti lamanya hujan, sifat permukaan tanah, area tangkapan dan permeabilitas tanah (Hardiyatmo, 2006 ©).

2. Tekanan Air Pori Negatif

Zona tekanan air pori 34egative terdapat diatas muka air tanah. Dalam zona tersebut tekanan air pori lebih kecil daripada tekanan atmosfer. Tekanan pori 34egative sering disebut *suction* yang dikontrol oleh tarikan permukaan pada batas antara udara dan air didalam rongga pori serta dipengaruhi oleh ukuran butir tanah. Pada umumnya jika butiran tanah semakin kecil, maka tinggi tekanan kapiler akan semakin besar sehingga tekanan air pori 34egative *(suction)* juga semakin besar (Hardiyatmo, 2006 ©).

Tekanan air pori 34egative menambah tegangan efektif dalam massa tanah serta menambah stabilitas lereng. Untuk tanah tidak jenuh, Ho dan Fredlund (1982) dalam Hardiyatmo (2006) © merubah nilai kohesi dalam persamaan kuat geser tanah jenuh pada persamaan, menjadi:

$$\Sigma_c = \sigma_c' + (\sigma - u)\tan\phi_b \quad \text{..... (19)}$$

Keterangan:

σ_c = kohesi tanah total

σ_c' = kohesi efektif

u_a-u_w = isapan matrik (*matrix suction)*

ϕ_b = kemiringan *matrix suction*, ketika (σ-*ua*) konstan

Sehingga untuk tanah tidak jenuh (unsaturated), persamaan untuk kuat geser tanah adalah:

$$\sigma_c = \sigma_c' + (u_a - u_w) \tan\phi_b + (\sigma - u_a) \tan\phi' \quad \text{..... (20)}$$

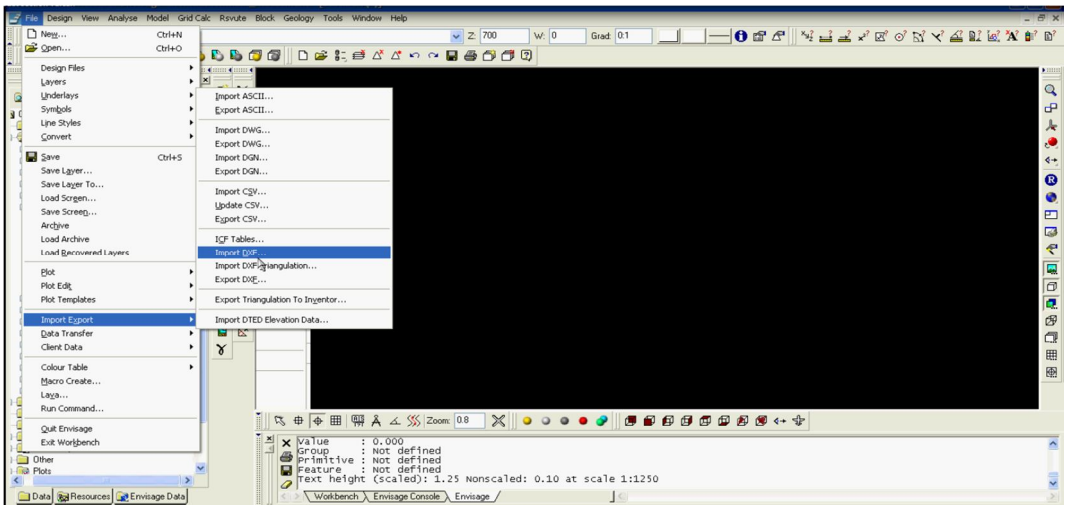
Dalam persamaan tersebut terlihat bahwa terdapat kenaikan kuat geser dari komponen kohesi nampak oleh akibat tekanan air pori negatif. Dengan kata lain, *matric suction* (u_a - u_w) menambah kuat geser tanah sebesar (u_a - u_w) tan ϕ_b. Kenaikan kuat geser tanah dapat dinyatakan dengan bidang runtuh tiga dimensi, yaitu dengan menggunakan variabel tegangan (σ - u_a) dan (u_a - u_w). Tekanan air pori negatif berkurang, jika derajat kejenuhan bertambah dan menjadi nol jika tanah menjadi jenuh sempurna. Sebagai contoh, saat hujan atau sesudah hujan lebat, tanah yang semula lembab dan bertekanan air pori negatif menjadi bertekanan air pori positif, karena telah berubah menjadi jenuh air /*saturated* (Hardiyatmo, 2006 (c).

G. Tutorial Membuat Section Menggunakan Software Vulcan 7.5 Dan Slope W (Geostudio 2007)

1. Membuat Section Menggunakan Software Vulcan 7.5

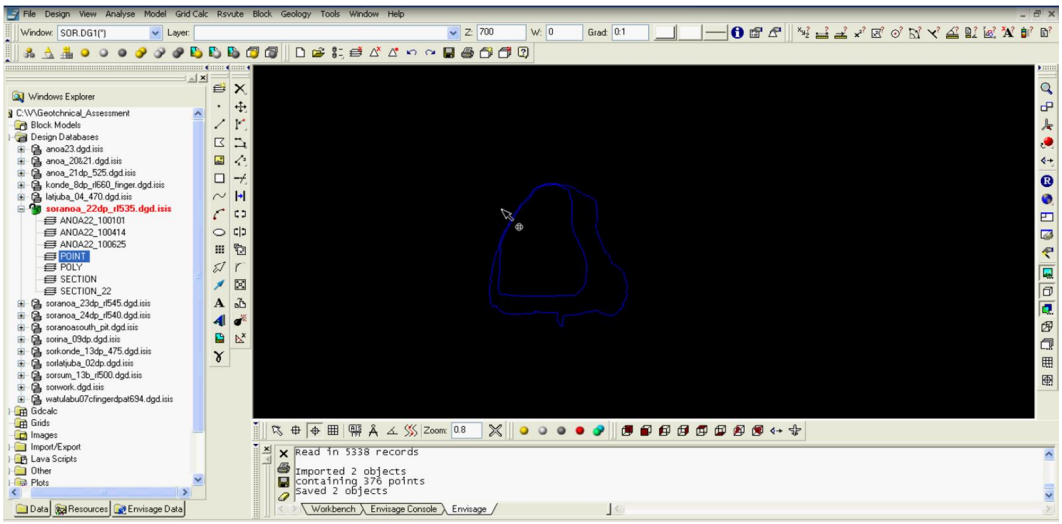
Salah satu kelabihan Software Vulcan 7.5 adalah lebih mudah dan lebih cepat proses pembuatan section, untuk software Vulcan 7.5 banyak di gunakan pada perusahaan tambang, berikut adalah tutorial bagaimana membuat section dengan membandingkan update topo, design, dan data topo sebelumnya.

Langka pertama adalah membuaka software kemudian klik File kemuadian Import file dxf yang akan di buatkan sectionnya, contoh pembuatan section seperti gambar di bawah ini



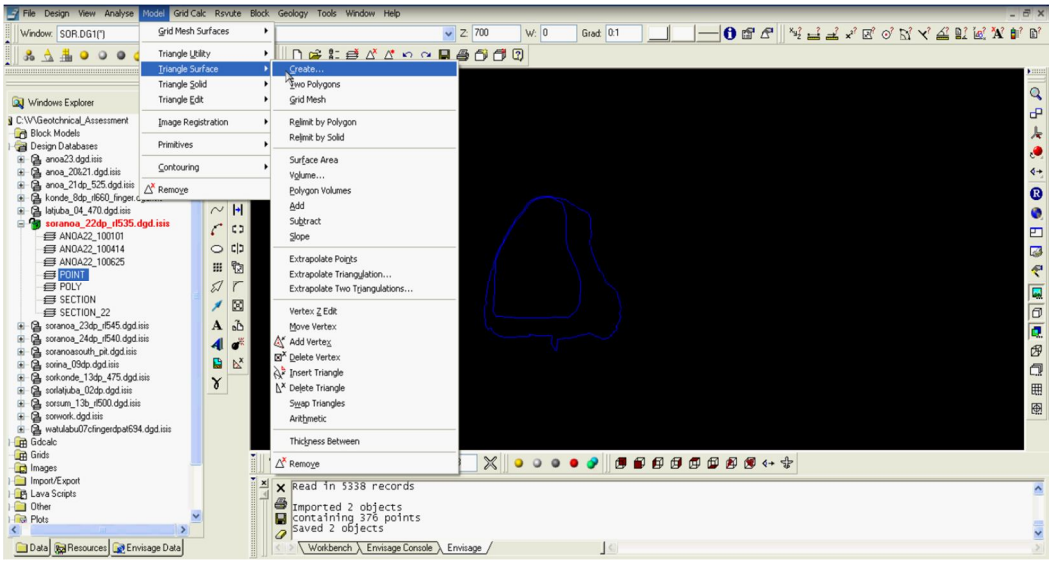
Gambar 14. Tampilan Vulcan 7.5

Dan pada layar kerja akan muncul file design yang akan di buatkan Section



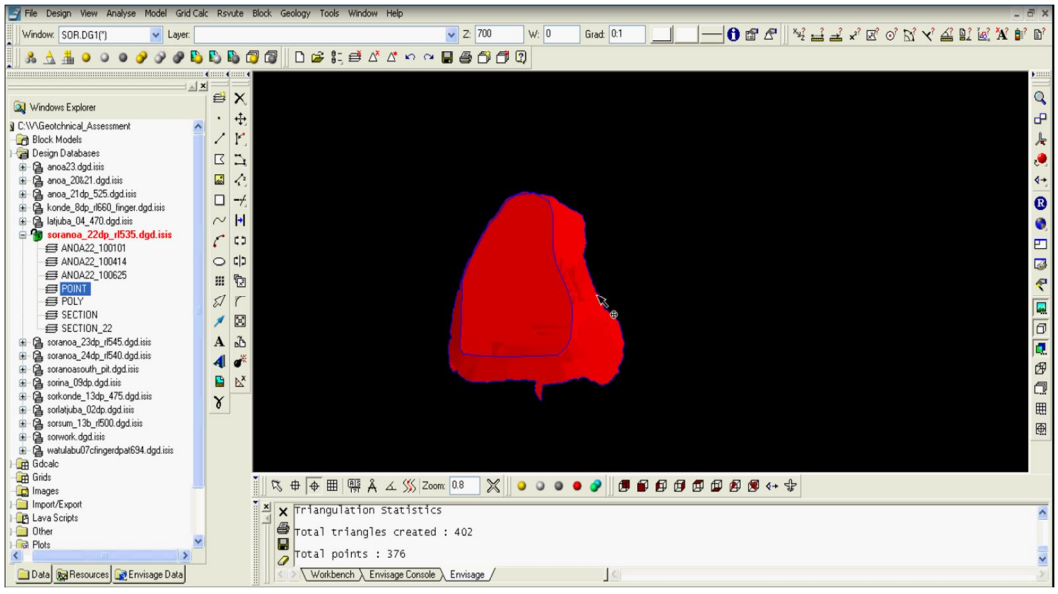
Gambar 15. Tampilan Vulcan 7.5

Kemudian pada gambar di sign buat tampilan 3D dengan melakukan triangulasi pada design dengan langkah seperti pada gambar di bawah.



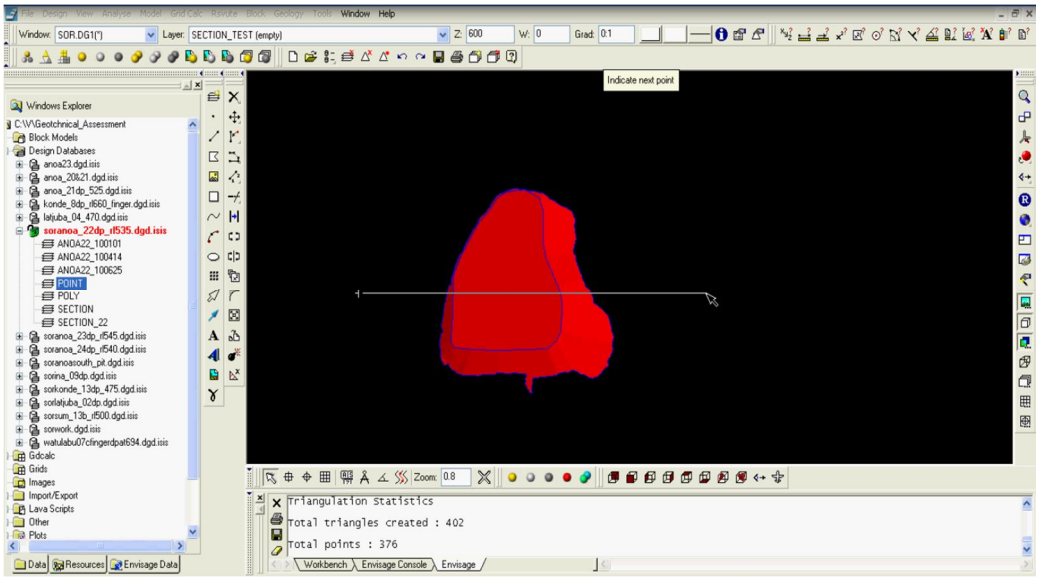
Gambar 16. Tampilan Vulcan 7.5

Tampilan 3D pada gambar design seperti gambar di bawah.



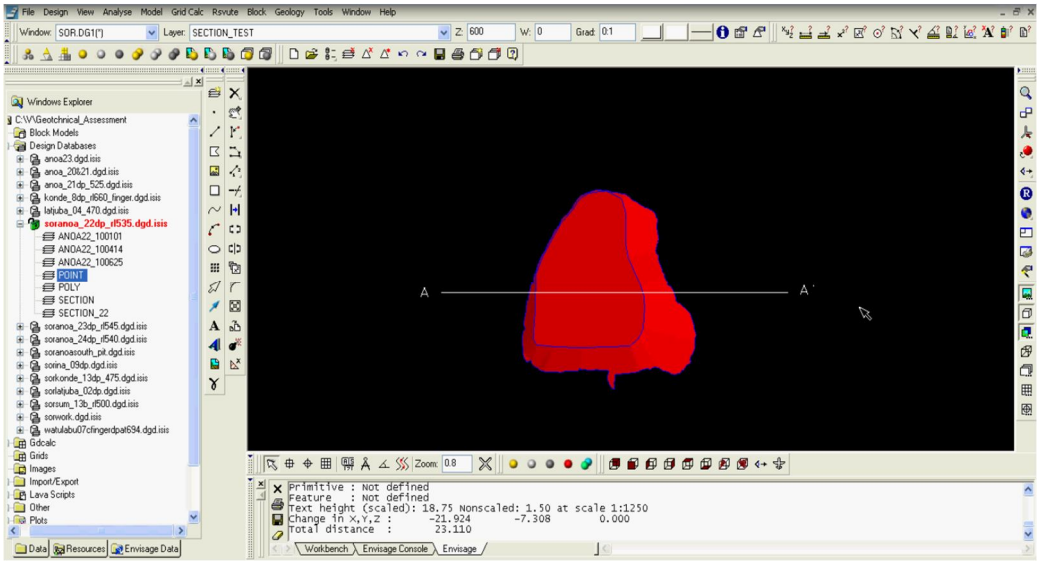
Gambar 17. Tampilan Vulcan 7.5

Kemuadian tarik garis pada design yang akan di buatkan section seperti gambar di bawah.



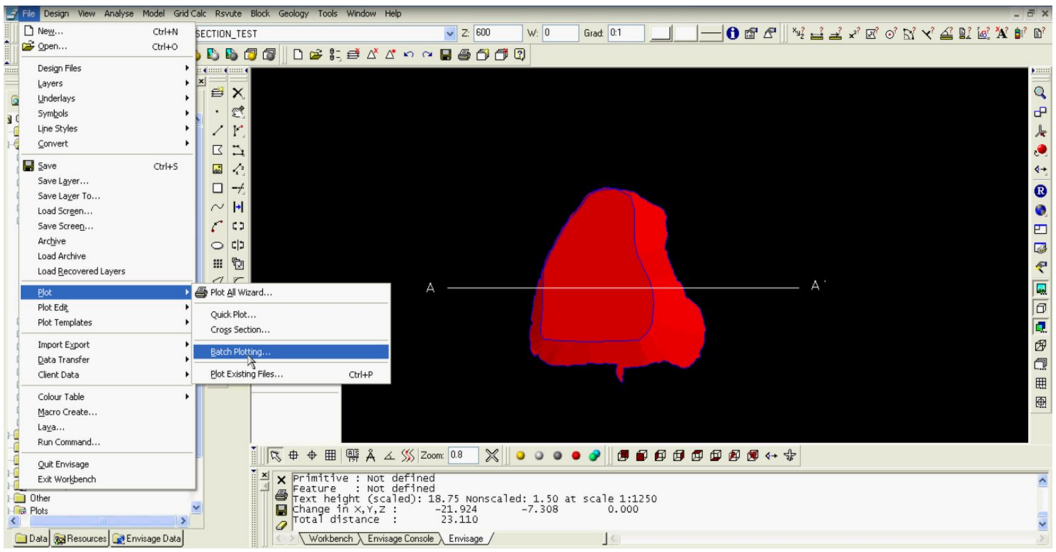
Gambar 18. Tampilan Vulcan 7.5

Input text label pada garis section seperti gambar di bawah.



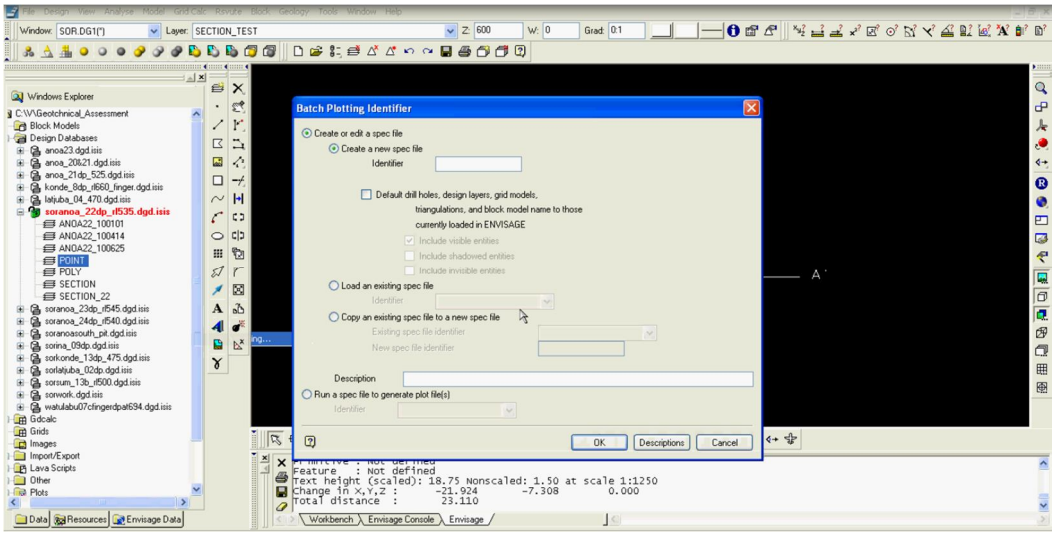
Gambar 19. Tampilan Vulcan 7.5

Setelah garis section selesai masuk ke menu file kemudian pilih plot, batc ploting untuk masuk ke menu pembuatan section seperti gambar di bawah.



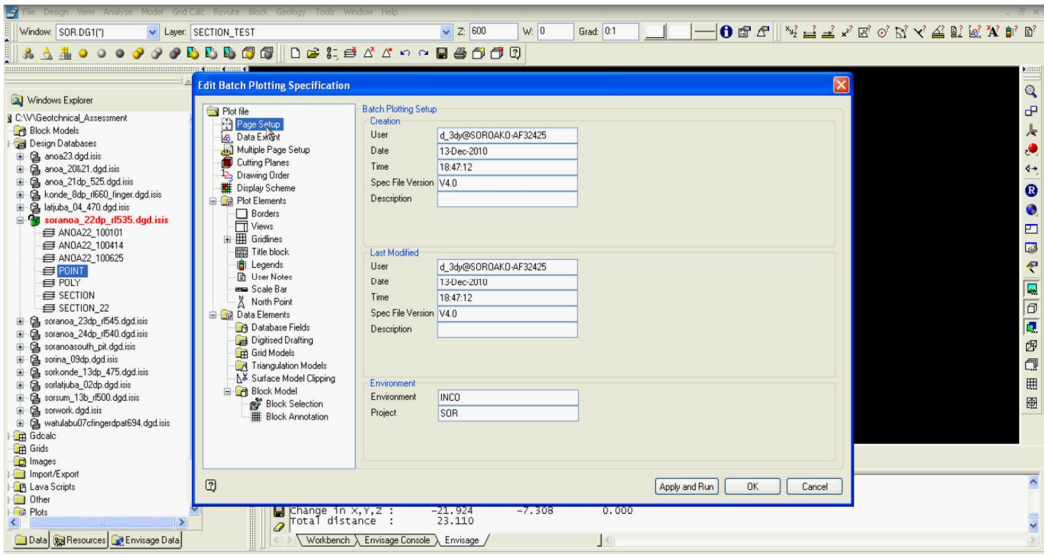
Gambar 20. Tampilan Vulcan 7.5

Isi nama untuk section pada menu identifier.



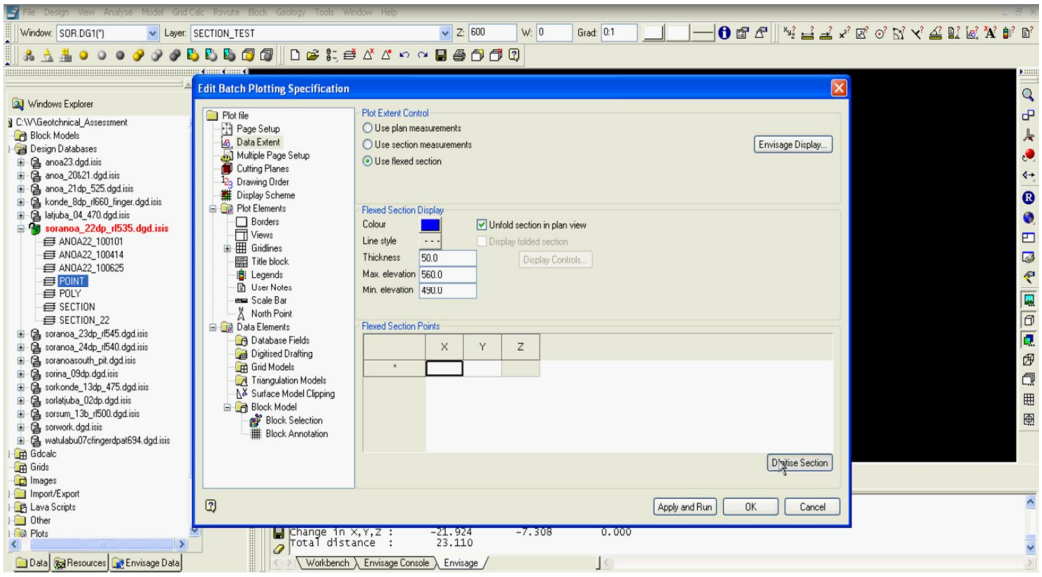
Gambar 21. Tampilan Vulcan 7.5

Menu batch plotting (pembuatan section) seperti gambar di bawah.



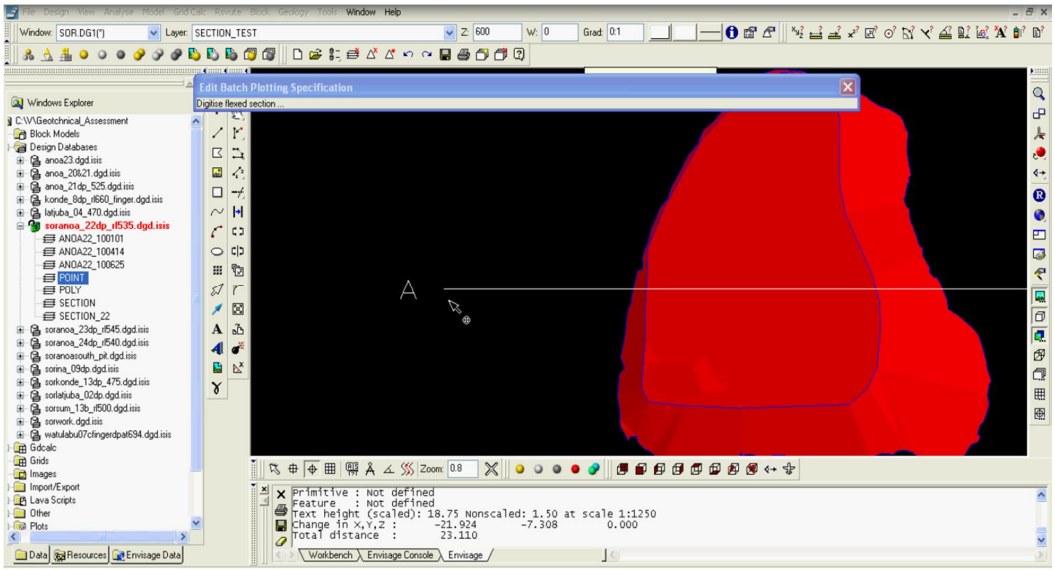
Gambar 22. Tampilan Vulcan 7.5

Pada menu batch plotting ikuti langkah langkah di bawah untuk mengatur ukuran, elevasi, skala, Langkah pertama seperti gambar di bawah.



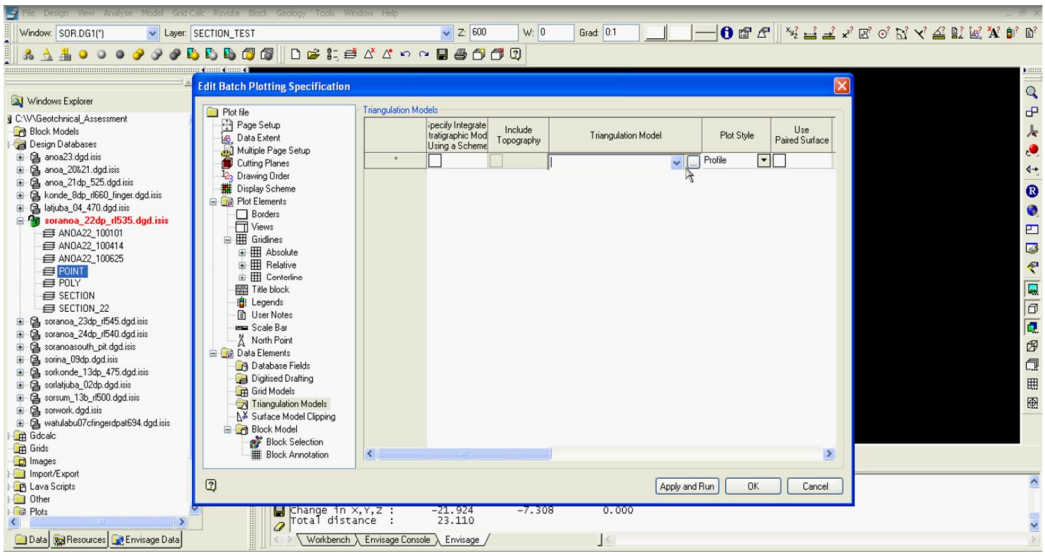
Gambar 23. Tampilan Vulcan 7.5

Langkah Kedua



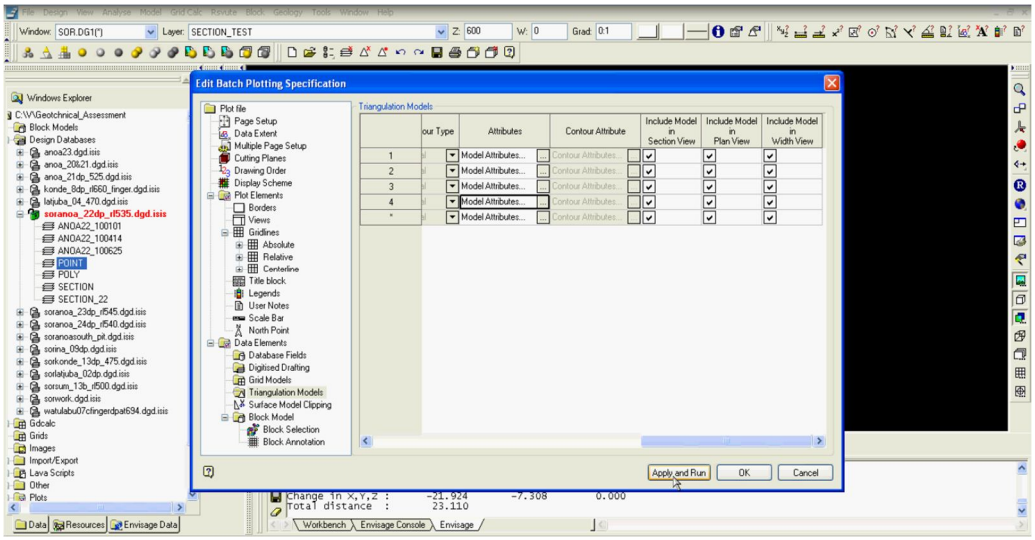
Gambar 24. Tampilan Vulcan 7.5

Langkah Ketiga



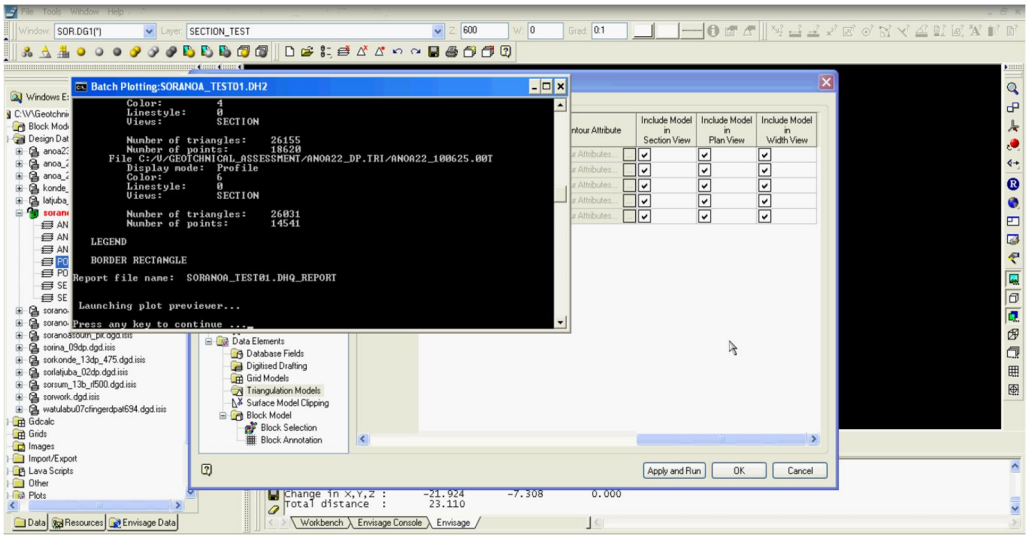
Gambar 25. Tampilan Vulcan 7.5

Langkah keempat setelah pengaturan selesai klik Apply and Run untuk membuat section seperti gambar di bawah.



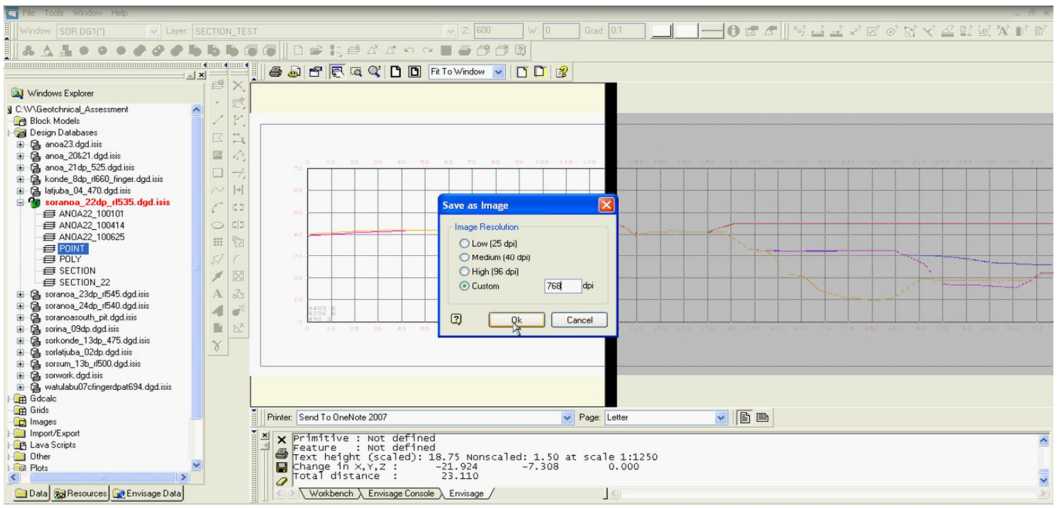
Gambar 26. Tampilan Vulcan 7.5

Dan akan muncul menu windows kemudian klik apa saja pada keyboard untuk menutup layar windows seperti pada gambar di bawah.



Gambar 27. Tampilan Vulcan 7.5

Dan akan muncul gambar section yang telah selesai kita buat seperti pada gambar di bawah, kemudian save dan simpan pada lokasi yang kita inginkan.

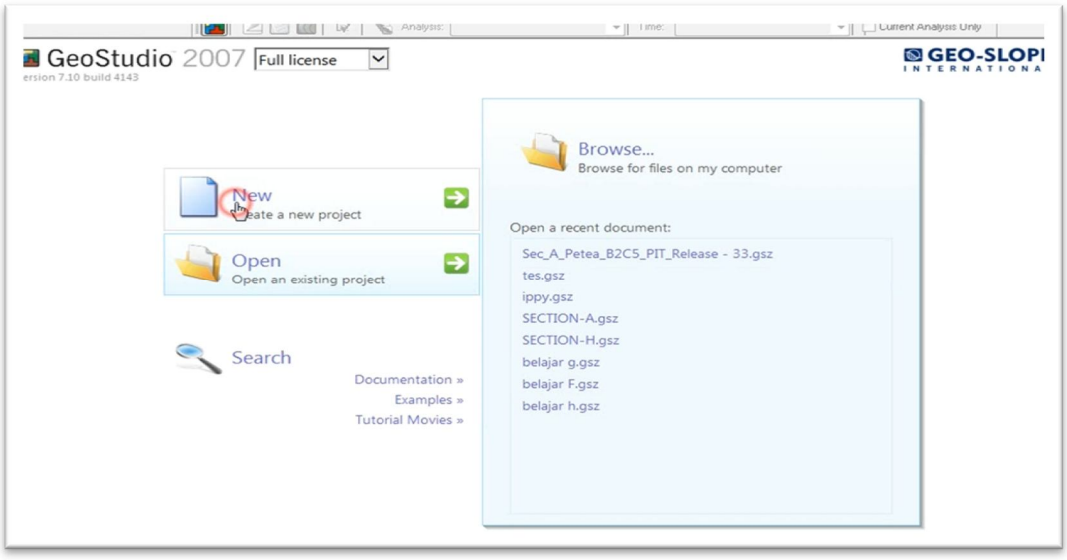


Gambar 28. Tampilan Vulcan 7.5

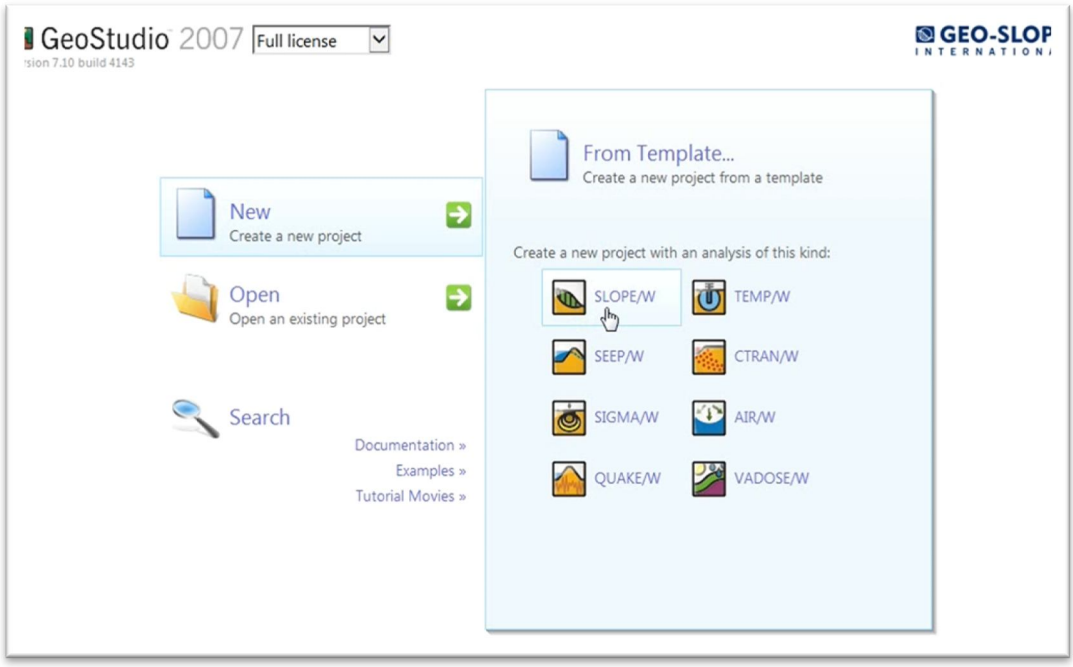
2. Totorial Membuat Analisa Kestabilan Lereng Menggunakan Software Geostudio SLOVE W 2007-

Salah satu kelabihan Software Slove W 2007 adalah lebih mudah dan terdapat beberapa metode yang dapat di gunakan, untuk software Slope W 2007 di gunakan untuk menentukan Nilai Faktor keamanan dalam comendasi Geotehnik, berikut adalah tutorial bagaimana cara melakukan Analisa kestabilan lereng untuk mendapatkan nilai Faktor keamanan pada suatu design langkah kerja sebagai berikut :

Langkah pertama adalah buka softwere kemudian klik new kemudian pilih Slope W.

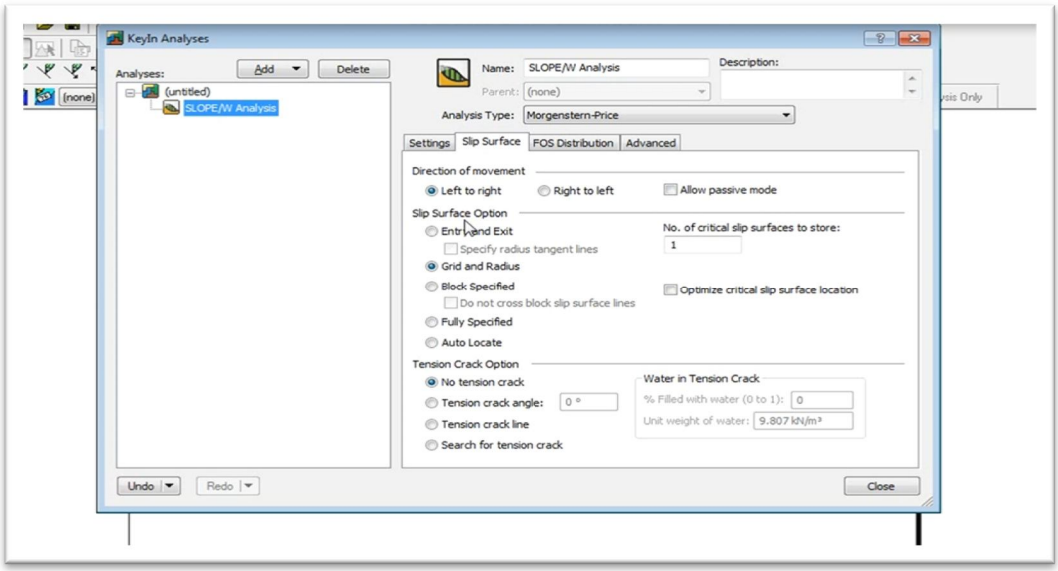


Gambar 29. Tampilan Slope W 2007

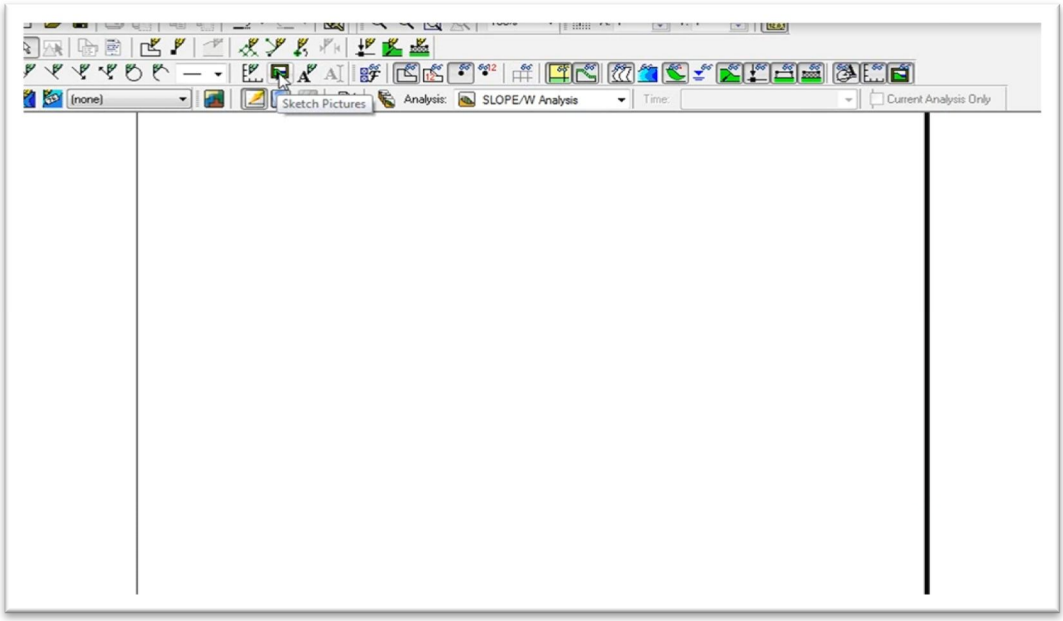


Gambar 30. Tampilan Slope W 2007

Kemudian atur properties layer kerja sesuai dengan kebutuhan dan pemodelan yang akan di lakukan.

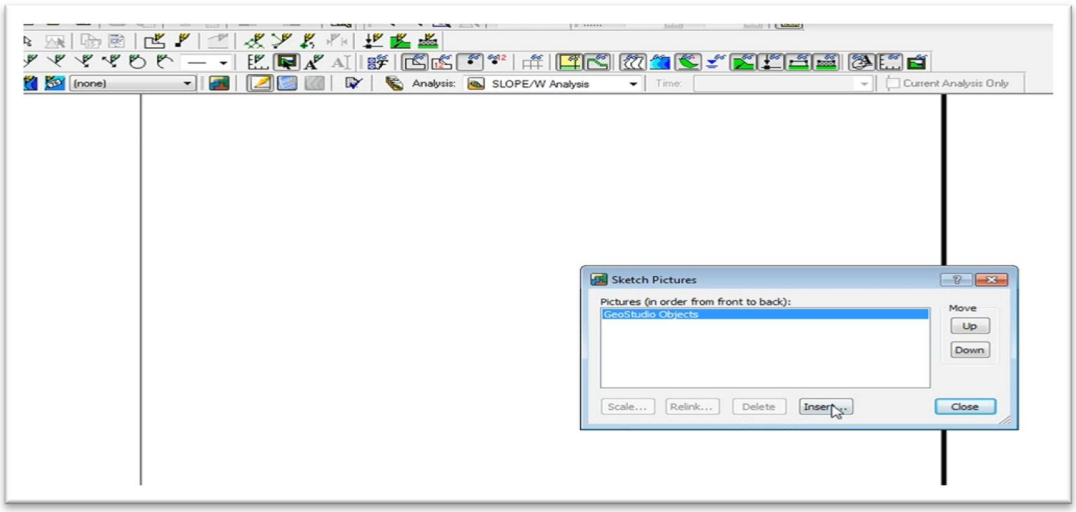


Gambar 31. Tampilan Slope W 2007



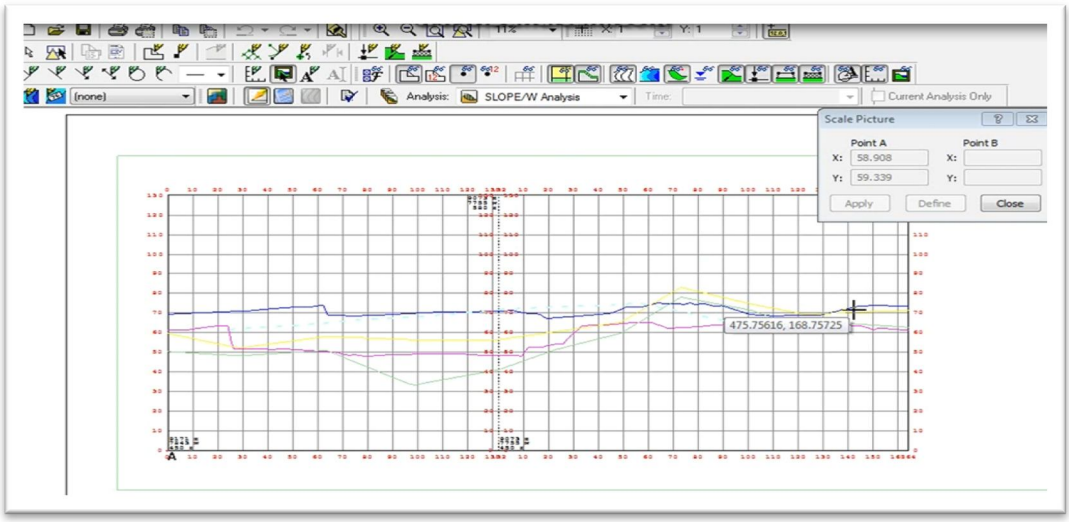
Gambar 32. Tampilan Slope W 2007

Setelah masuk ke layer kerja masukan data sectin lokasi yang telah di buat di softwere vulkan.



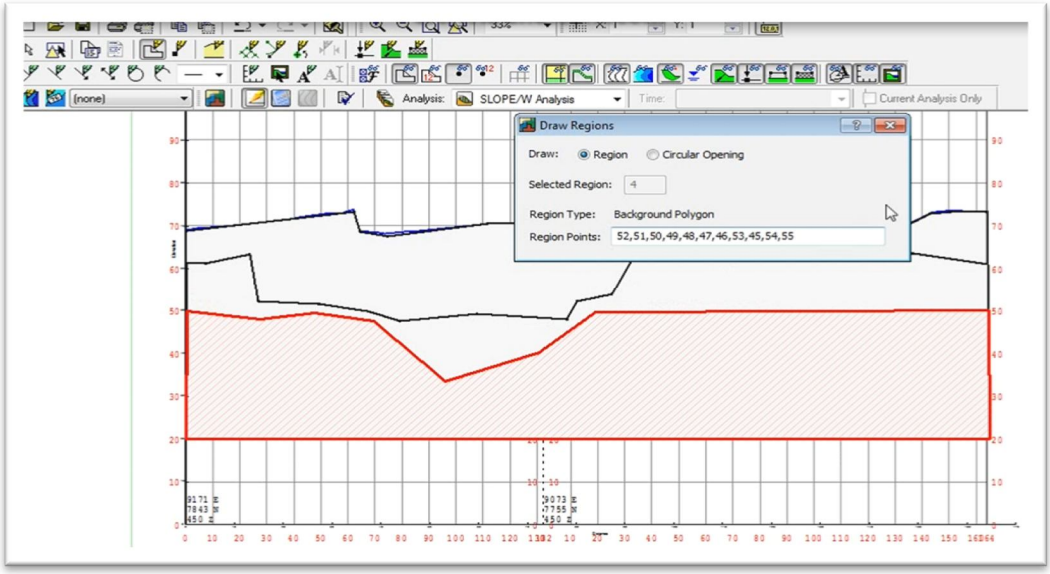
Gambar 33. Tampilan Slope W 2007

Atur scala pada gambar section



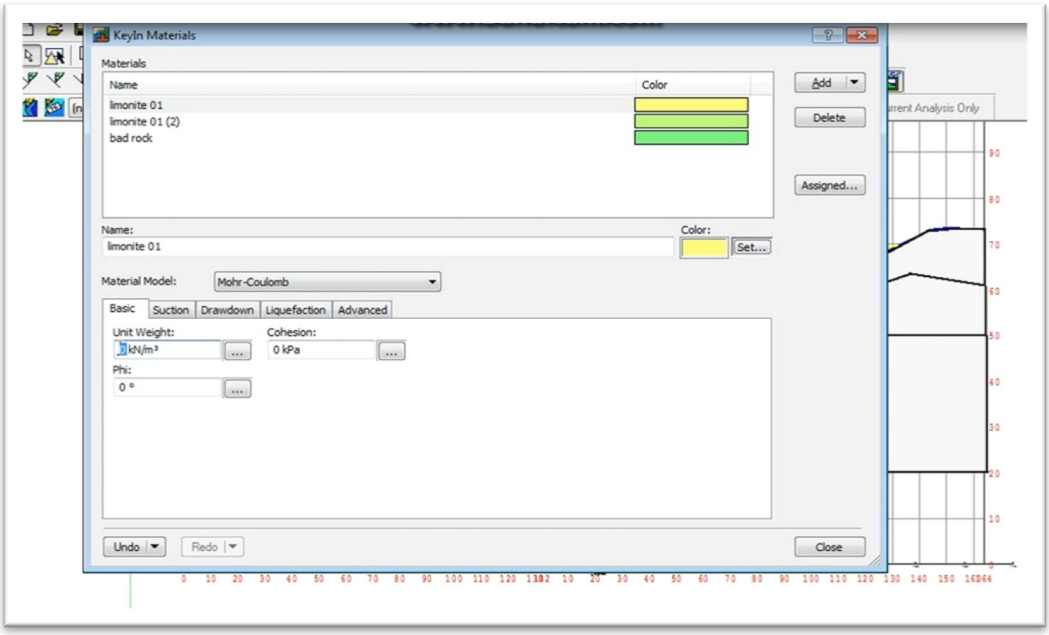
Gambar 34. Tampilan Slope W 2007

Buat Region tiap tiap lapisan pada section yang telah di buat.

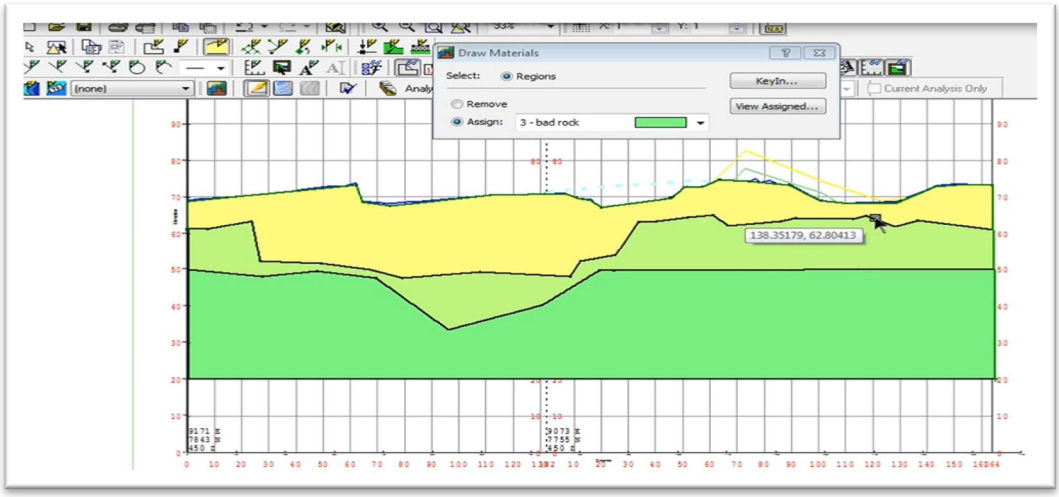


Gambar 35. Tampilan Slope W 2007

Masukkan properties tiap tiap lapisan

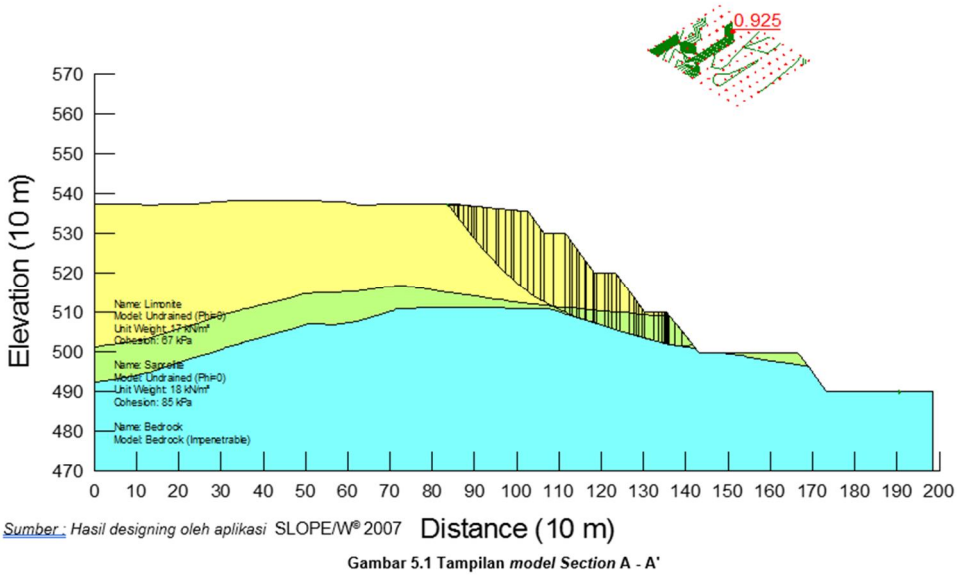


Gambar 36. Tampilan Slope W 2007



Gambar 37. Tampilan Slope W 2007

Setelah region dan data selesai di masukan klik tombol analisis maka softwere akan secara otomatis menjalankan Analisa untuk mendapatkan nilai factor keamanan sesuai dengan data yang telah dimasukkan, hasi; ahir yang akan keluar seperti contoh gambar di bawah :



Sumber : *Hasil designing oleh aplikasi* SLOPE/W® 2007

Gambar 5.1 Tampilan *model Section* A - A'

Gambar 38. Tampilan Slope W 2007

H. Kajian Terdahulu

Beberapa Penelitian terdahulu yang berkaitan dengan tugas ahir ini yang telah di lakukan oleh beberapa peneliti di tempat yang berbeda dan waktu yang berbeda adalah sebagai berikut :

1. Judul : Analisis Kestabilan Lereng pada Disposal Dump di Wilayah PT. INCO, Tbk

   Oleh : Andika Budi.H Universitas Institut Teknologi Bandung (ITB)

Untuk setiap disposal yang akan digunakan harus mendapat persetujuan terlebih dahulu dari sisi geoteknik, apakah disposal tersebut aman untuk mendukung operasi mining di PT INCO. Seksi geoteknik akan menerima permintaan untuk melakukan analisis terhadap design suatu lereng disposal. Setelah melakukan verifikasi kasus, *geotechnical engineer* akan melakukan penyelidikan lapangan yang mengacu pada buku *Geotechnical Manual Mine Department* untuk bentuk, geometri, serta struktur lapisan pada daerah tersebut.

Selanjutnya *geotechnical engineer* akan membuat section area menggunakan perangkat lunak (software) Vulcan dan Autodesk berdasarkan hasil survey topografi terkini. Penarikan section diusahakan yang tegak lurus terhadap kontur. Hal berikutnya yaitu melakukan pembagian lapisan-lapisan area dengan mengikuti pola struktur tanah atau data topografi dengan data-data kekuatan geser tanah (shear strength) harus mengacu kepada data-data yang ada atau berdasarkan

kalkulasi yang dilakukan oleh geotechnical engineer. Lalu dilakukanlah analisis kestabilan lereng yang mengacu prinsip-prinsip geoteknik dengan menggunakan perangkat lunak (software) Geostudio : Slope/w. Design disposal akan direkomendasikan dari seksi geoteknik jika mempunyai faktor keamanan ≥ 1,2.

Ada 3 disposal yang akan dihitung faktor keamanannya (masing-masing merepresentasikan jenis-jenis disposal di PT INCO), yaitu:

Kesimpulan:

1. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak (software) slope/W untuk masing-masing disposal Anoa H 9 (Semi Induced), Anoa H 13 (Fingered), Latjuba 05 (Induced dengan Backstop) diperoleh faktor keamanan > 1,2 sehingga direkomendasikan untuk digunakan.
2. Hasil dari membandingkan antara hitung manual dengan hasil dari perangkat lunak (software) Slope/w menunjukkan bahwa Slope/w memiliki prinsip geoteknikal yang sama namun Slope/w menghasilkan faktor keamanan yang lebih rendah. Perhitungan menggunakan Slope/w lebih teliti dan akurat karena proses iterasi yang lebih banyak.

Saran:

Pemantauan / inspeksi tiap minggu sangat diperlukan, supaya lereng selalu tetap berada dalam geometri yang disarankan (sesuai plan) dan

aman untuk masing-masing area. Jika aktual melebihi plan, berarti beban bertambah sehingga akan mengurangi tingkat keamanan lereng.

1. Untuk material hasil timbunan yang belum diketahui material propertiesnya, sebaiknya dilakukan penyelidikan tanah terlebih dahulu.
2. Rambu-rambu disposal harus selalu terpasang, dan membutuhkan pengawasan. Berdasarkan kenyataan di lapangan, operator sering tidak mematuhi rambu-rambu yang ada.
3. Alat pemantauan lebih diefektifkan dan diefisienkan penggunaannya sebagai langkah antisipasi jika akan terjadi longsoran.

2. Judul : ANALISA KESTABILAN LERENG DENGAN EMBANDINGKAN PERHITUNGAN SECARA MANUAL DENGAN SLOPE-©/GEOSTUDIO 2007 PADA *NICKEL HILL PIT COMPARTEMENT* 02 DI PT VALE INDONESIA Tbk, SOROWAKO, KABUPATEN LUWU TIMUR, PROVINSI SULAWESI SELATAN.

   Oleh : Lilian Universitas Trisakti

   Adapun maksud dan tujuan Penelitian

   - Mengetahui metode-metode pengambilan data parameter geoteknik di lapangan, seperti kuat geser tanah tak terdrainase (*undrained shear strenght*) dan konsistensi tanah yang diperoleh dari pekerjaan insitu test DCPT (Dutch Cone Penetration Test).
   - Mengetahui metode-metode pengambilan data parameter geoteknik di laboratorium, seperti sifat penunjuk tanah (*index properties*) dan sifat mekanika tanah (*mechanical properties*).

- Memperoleh nilai faktor keamanan pada suatu lereng yang ditinjau berdasarkan kondisi geologi, geometri lereng pada lokasi penambangan di PT Vale Indonesia, Sorowako.
- Membandingkan faktor keamanan hasil perhitungan manual dengan hasil perhitungan menggunakan software (Slope/W©-GeoStudio 2007).

Kesimpulan

Analisis stabilitas rencana lereng *pit* dalam *geotechnical assessment* merupakan kunci utama untuk mewujudkan konstruksi *pit* yang *applicable* (dapat diterapkan saat di lapangan) dan aman terkait *concern* terhadap *safety issue* pada area operasi penambangan PT Vale Indonesia Tbk. Secara umum, hal ini dilakukan dengan tujuan mendukung suksesnya keseluruhan rangkaian operasi penambangan agar dapat berlangsung dengan aman. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Lereng *Nickel Hill pit* dianalisa dengan kondisi *undrained shear strength*, karena kondisi tersebut merupakan kondisi jenuh total sehingga nilai FK merupakan nilai yang kritis.
2. Rencana awal desain model *Nickel Hill pit* dengan penampang melintang A – A', B – B' dan C – C' tidak memenuhi kriteria faktor keamanan (tidak direkomendasikan) dari suatu lereng (FK<1,2), maka perlu dilakukan modifikasi/*redesigning* pada geometri lereng tersebut.
3. Modifikasi (*redesigning*) dilakukan dengan memundurkan batas pit (pit limit) dari desain lereng awal, sehingga desain pit awal menjadi lebih luas.
4. Perbedaan nilai FK dari perhitungan secara manual dengan Slope-W© 2007 terletak pada lebar irisan, sudut yang dibentuk dari setiap irisan.

5. Perolehan nilai FK setelah dimodifikasi baik secara perhitungan manual maupun dengan Slope-W© 2007 yaitu sama-sama FK 1.2 Nilai FK minimum yang didapatkan dari hasil analisis stabilitas lereng adalah 1,30 sedangkan nilai FK maksimum adalah 1,49 dengan menggunakan Slope-W© 2007.
6. FK rata-rata *(average Factor of Safety)* secara keseluruhan dari rekomendasi desain rencana lereng *Nickel Hill pit* setelah dilakukan *redesigning* ialah 1,39. Artinya, rekomendasi desain lereng tersebut dapat diterapkan di lapangan (*applicable*).

Saran

1. Sangatlah penting bagi geotechnical *engineer* untuk mengetahui teori dan perhitungan secara manual untuk mencari solusi ketika lereng berada pada kondisi tidak stabil, sebab semua berawal dari pengetahuan yang diperoleh dari studi literatur maupun praktek di lapangan. *Software* dalam keseharian digunakan untuk membantu dan mempermudah kegiatan sehari-hari.
2. Mematuhi rekomendasi geotek terhadap rekomendasi geometri lereng sangatlah penting untuk menghindari potensi kegagalan lereng (kelongsoran).

BAB III

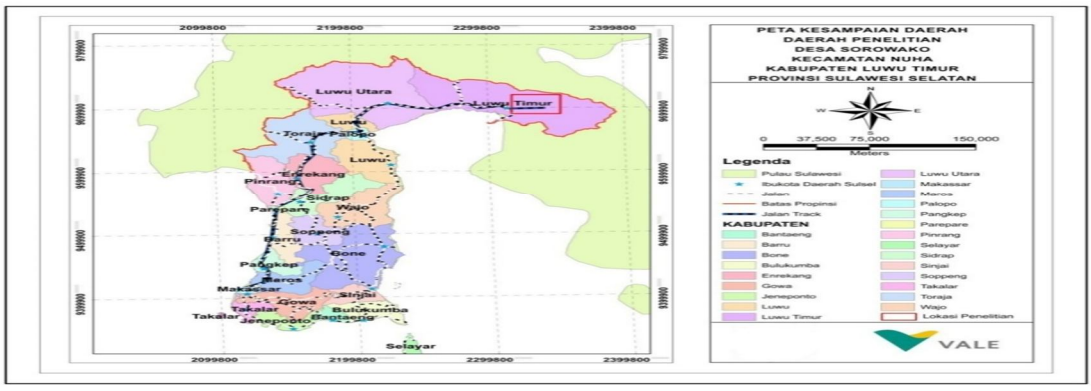
METODOLOGI PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Penelitian dalam ini menggunakan metode evaluasi dengan membandingkan hasil analisis dengan standar ketetapan yang berlaku di area tersebut. Penelitian dilakukan dengan mengevaluasi geometri lereng dari satu *section* yang telah ditentukan dan jika belum memenuhi kriteria minimum yang telah ditetapkan, akan dilakukan desain ulang lereng secara keseluruhan. Beberapa variabel yang akan dievaluasi adalah lebar lereng, tinggi lereng dan sudut lereng.

B. Lokasi Dan Waktu Penelitian

Kegiatan Penelitian ini dilaksanakan selama ± 2 bulan, terhitung sejak tanggal 20 April 2019 sampai 20 Juni 2019, bertempat di lokasi rencana penambangan nikel laterit PT Vale Indonesia Tbk, area Petea *Pit B2C4*. Secara administratif, lokasi peneitian termasuk dalam *area site* sorowako yang terletak di Sorowako, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan.



Gambar 39. Peta daerah studi penelitian

C. Sumber Data

Adapun sumber data dalam penelitian ini terbagi atas dua jenis :

1.1.1 Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh dengan cara pengamatan langsung, pada penelitian ini hanya didapatkan data Foto Observasi Lapangan.

1.1.2 Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari hasil penelitian yang pernah dilakukan di daerah penelitian tersebut, berupa:

a. Peta Geologi Regional dan Lokal
b. Peta Topografi daerah penelitian
c. Peta Desain Pit daerah penelitia
d. Data struktur geologi lokal daerah penelitian
e. Data *Core Analyses* Geoteknik daerah penelitian yang meliputi:

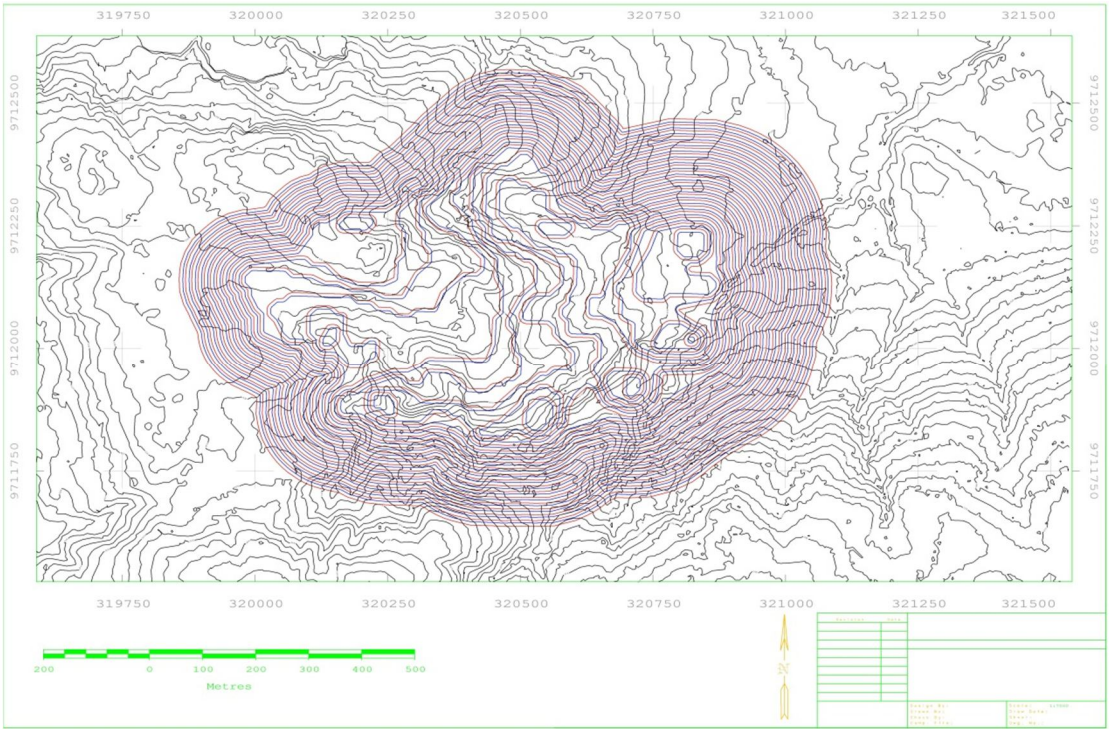
Sifat Fisik	Sifat Mekanik
a. Bobot isi kering (ɣd (kN/m3))	1). Nilai kohesi (C (kPa))
b. Bobot isi jenuh (ɣm (kN/m3))	2). Sudut gesek dalam (Φ'(°))
c. Kadar air (ωn (%))	
d. Batas cair tanah (ωL (%))	
e. Batas plastis tanah (ωP (%))	
f. Indeks plastisitas tanah (IP (%))	
g. Distribusi ukuran partikel (%)	

D. Tahap Penelitian

Di tahapan ini, penulis melakukan serangkaian kegiatan pengumpulan data, yakni pengambilan data lapangan, data topografi daerah penelitian, data *cross section Nickel Hill pit Compartement* 05.

1. Lokasi HILL B2C4

Penelitian ini dilakukan pada daerah *West Block* Sorowako *Pit* yang merupakan salah satu dari wilayah konsesi utama PTVI. Lokasi penelitian dipusatkan pada *Nickel Hill Pit Compartement* 05**.**



Gambar 40. Peta daerah studi penelitian

2. Data *Critical Cross Section*

Data critical cross section adalah data berupa gambar penampang melintang (vertikal) topografi *Nickel Hill Pit Compartement* 05 yang dianggap kritis/critical yang diperoleh dari hasil sayatan aplikasi Vulcan™

7.5. Data ini memperlihatkan kenampakan perlapisan material Anoa South disposal secara aktual serta plan-nya. Penentuan lokasi penyayatan ini pada aplikasi Vulcan™ 7.5 didasarkan pada beberapa hal, diantaranya :

a) Daerah-daerah dengan tingkat kedalaman yang paling besar dari permukaan tanah merupakan prioritas.
b) Keadaan topografi yang berpotensi mengalami kelongsoran karena perlu mendapatkan perhatian khusus.
c) Jumlah critical cross section yang dibuat setidaknya bersifat representatif/balanced terhadap kondisi aktual di lapangan dan plan yang ada.

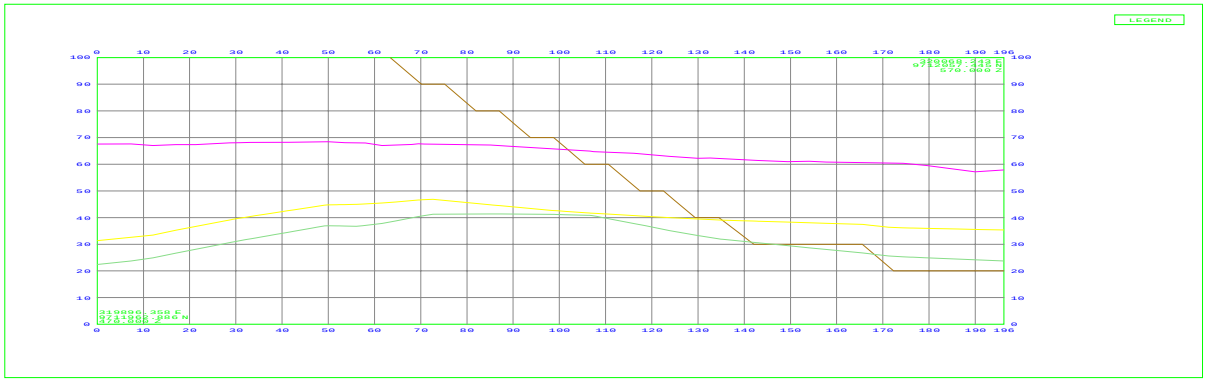
Pada *Nickel Hill Pit Compartement* 05 , penulis diberikan sebanyak 12 (dua belas) critical cross sections, yakni A – A', B – B', C – C', D – D', E – E', F – F', G – G', H – H', I – I', J –J', K – K' dan L – L' (Gambar 4.2). Untuk lebih jelasnya, berikut ini ditampilkan penjabaran tiap critical cross section.



Gambar 41 Lokasi *Critical Cross Section* pada *Nickel Hill Comaprtement 05*

a. Section A – A’

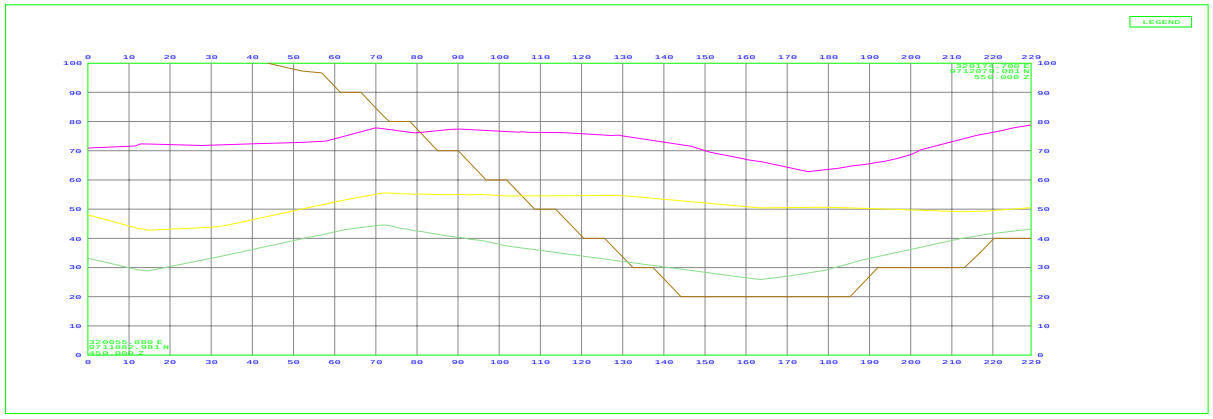
Berdasarkan Gambar 42 , garis *section* ini ditarik dari arah barat daya menuju timur laut. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar 42 Tampilan *Section* A – A’

b. Section B – B’

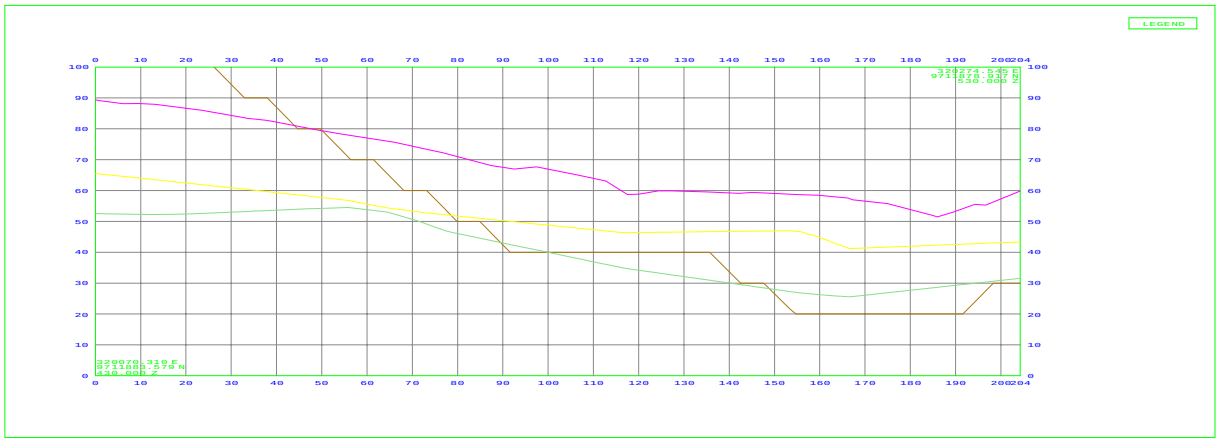
Berdasarkan Gambar 43 , garis *section* ini ditarik dari arah barat daya menuju timur laut. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.43 Tampilan *Section* B – B’

c. Section C – C’

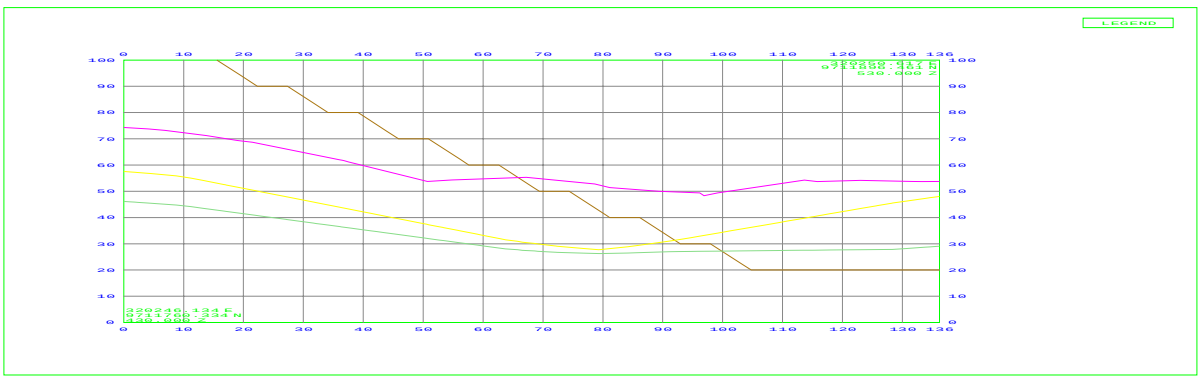
Berdasarkan Gambar 44 , garis *section* ini ditarik dari arah barat menuju timur. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.44 Tampilan *Section* C – C’

d. Section D – D’

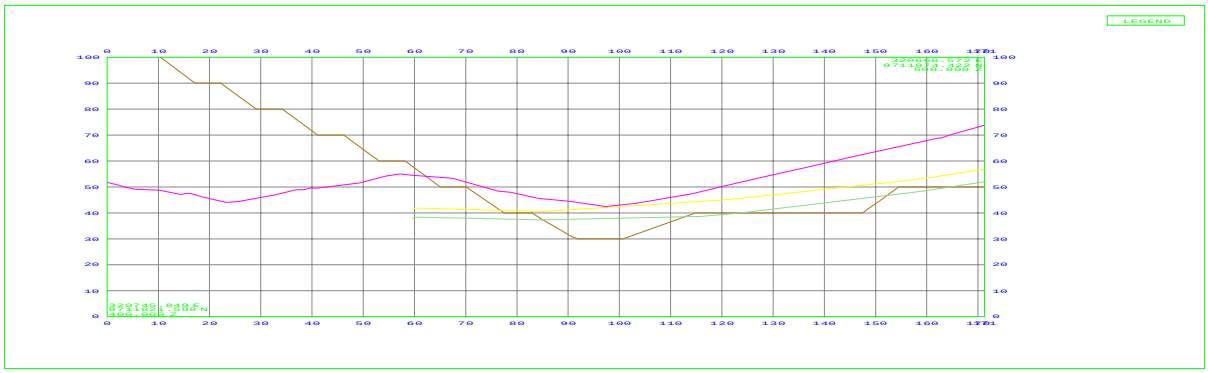
Berdasarkan Gambar 45 , garis *section* ini ditarik dari arah selatan menuju utara. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.45 Tampilan *Section* D – D’

e. Section E – E’

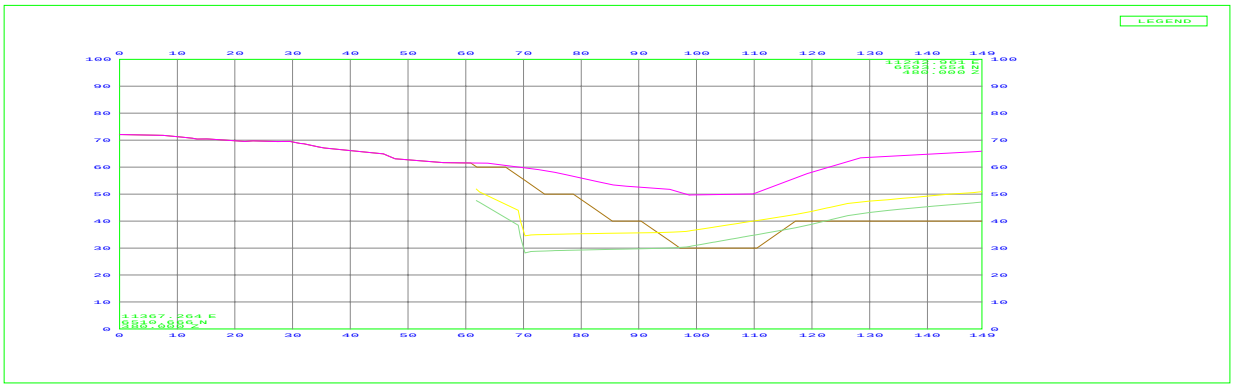
Berdasarkan Gambar 46 , garis *section* ini ditarik dari arah tenggara menuju barat laut. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.46 Tampilan *Section* E – E’

f. Section F – F’

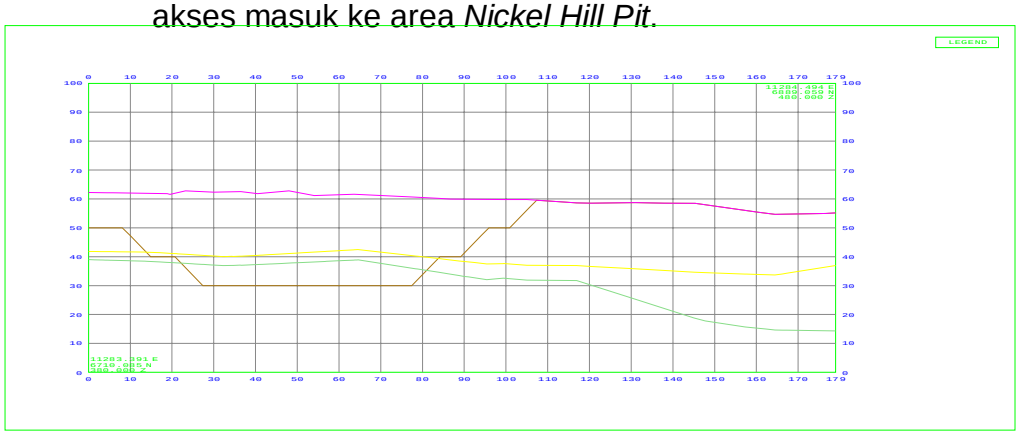
Berdasarkan Gambar 47 , garis *section* ini ditarik dari arah tenggara menuju barat laut. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.47 Tampilan *Section* F – F’

g. Section G – G’

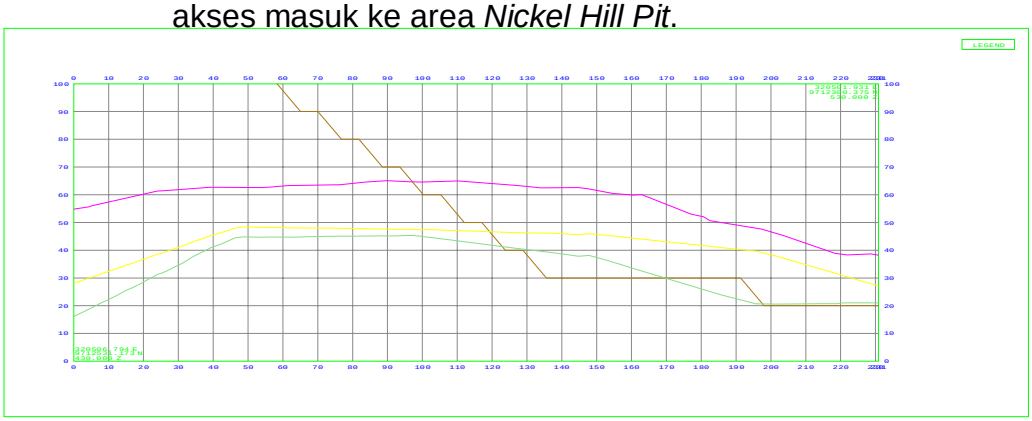
Berdasarkan Gambar 48 , garis *section* ini ditarik dari arah utara menuju selatan. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.48 Tampilan *Section* G – G’

h. Section H – H’

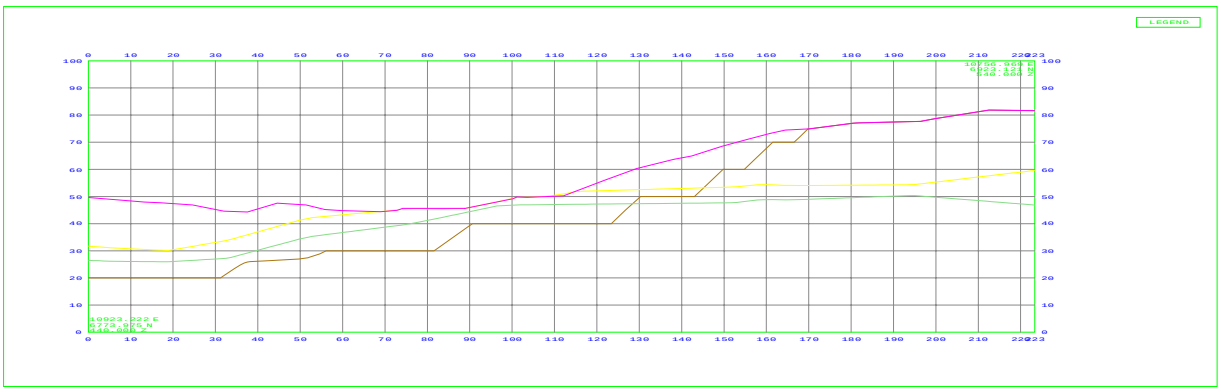
Berdasarkan Gambar 49 , garis *section* ini ditarik dari arah utara menuju selatan. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.49 Tampilan *Section* H – H’

i. Section I – I’

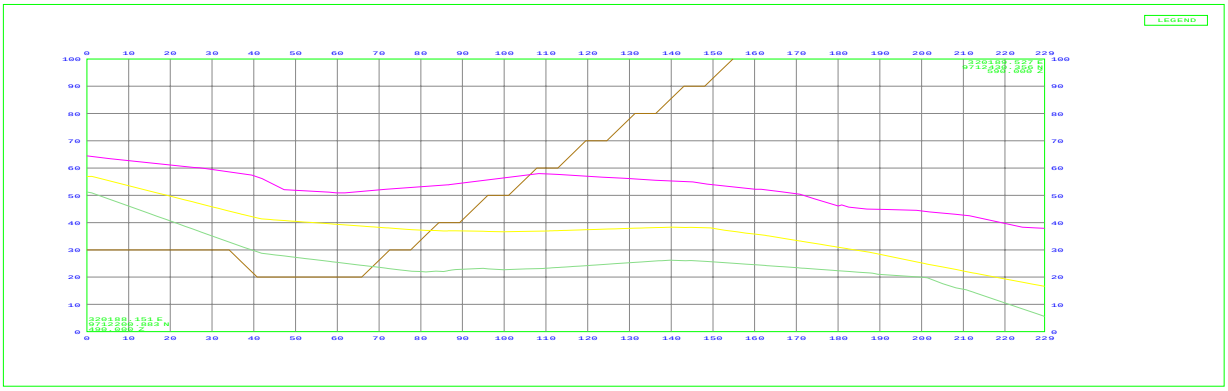
Berdasarkan Gambar 50 , garis *section* ini ditarik dari arah barat laut menuju tenggara. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.50 Tampilan *Section* I – I’

j. Section J – J’

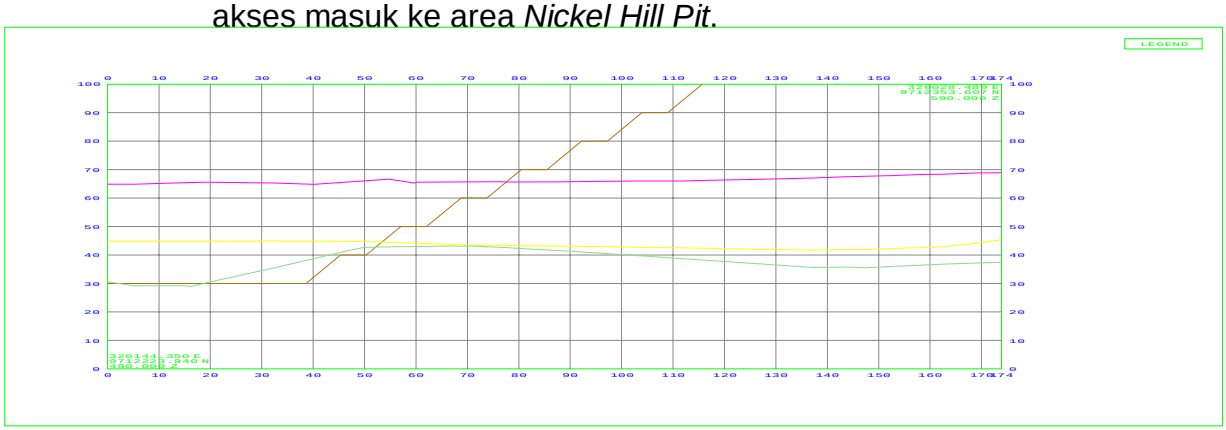
Berdasarkan Gambar 51, garis *section* ini ditarik dari arah utara menuju selatan. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.51 Tampilan *Section* J – J’

k. Section K – K’

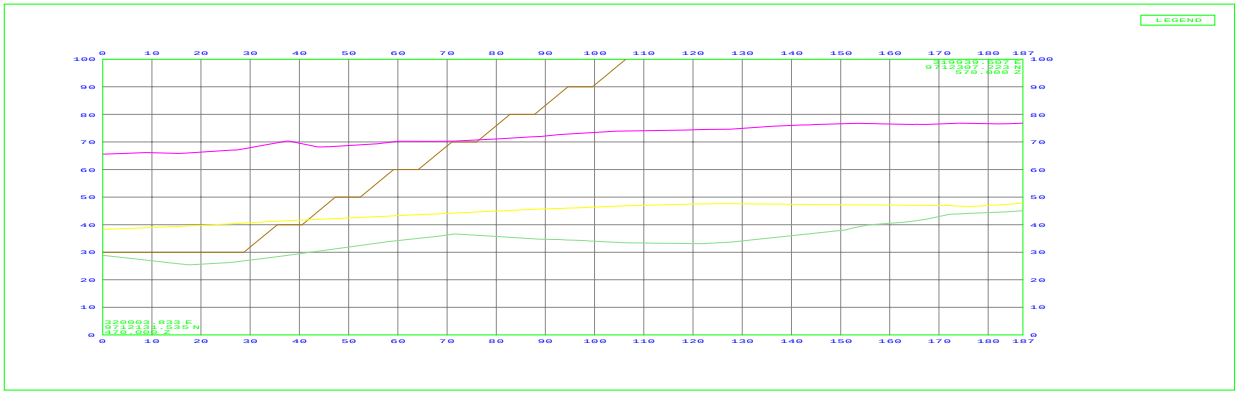
Berdasarkan Gambar 52 , garis *section* ini ditarik dari arah barat laut menuju tenggara. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.52 Tampilan *Section* K – K’

l. Section L – L’

Berdasarkan Gambar 53 , garis *section* ini ditarik dari arah barat laut menuju tenggara. Pada *section* ini, terlihat penampang perlapisan material dan lereng jalan untuk akses masuk ke area *Nickel Hill Pit*.



Gambar.53 Tampilan *Section* L – L’

3. Tahap Pengolahan Data

a) Rincian *Material Properties* untuk Analisis Stabilitas Lereng

Yang dimaksud dengan *material properties* disini adalah ciri khas atau karakteristik material yang menyusun perlapisan tanah di daerah *Nickel Hill.* Adapun beberapa parameter yang termasuk dalam *material properties* ini yakni model kekuatan material (*model*), nilai berat unit material (*unit weight*), nilai kohesi material (*cohesion*) dan besar sudut geser dalam material (*phi*). Nilai-nilai material Properties ini didapatkan dari hasil uji laboratorium pada PTVI. Berikut ini dijabarkan mengenai deskripsi dari setiap *material properties*.

b) *Limonite*

Material ini dimodelkan dengan kekuatan geser *undrained* ($\phi = 0$) karena merupakan material *overburden* (OB). Nilai berat unitnya 17 kN/m^3. Dengan keadaan *undrained strength* ($\phi = 0$) maka besarnya nilai kohesi sama dengan nilai kuat tanah tak terdrainase (Su = c). Material ini mempunyai *range* nilai kuat tanah tak terdrainase antara 50 - 80 kPa. Untuk penelitian ini digunakan nilai kuat tanah tak terdrainase (Su) sebesar 67 kPa. . Nilai kuat tanah tak terdrainase (Su) pada *properties* tersebut didapatkan dari nilai rata-rata (*average*) *properties* sampel yang dimbil pada beberapa pemboran geoteknik yang mendekati lokasi *Nickel Hill Pit Compartement* 05, lokasi-lokasi pemboran geoteknik tersebut bisa

dilihat pada Lampiran A, nilai-nilai *properties* hasil dari uji *Triaxial Unconsolidated Undrained* pada tiap-tiap bor bisa dilihat pada Lampiran B, dan nilai rata-rata dari setiap lubang pemboran yang terdapat pada sekitar *Nickel Hill Pit Compartement* 05 bisa dilihat pada Lampiran C.

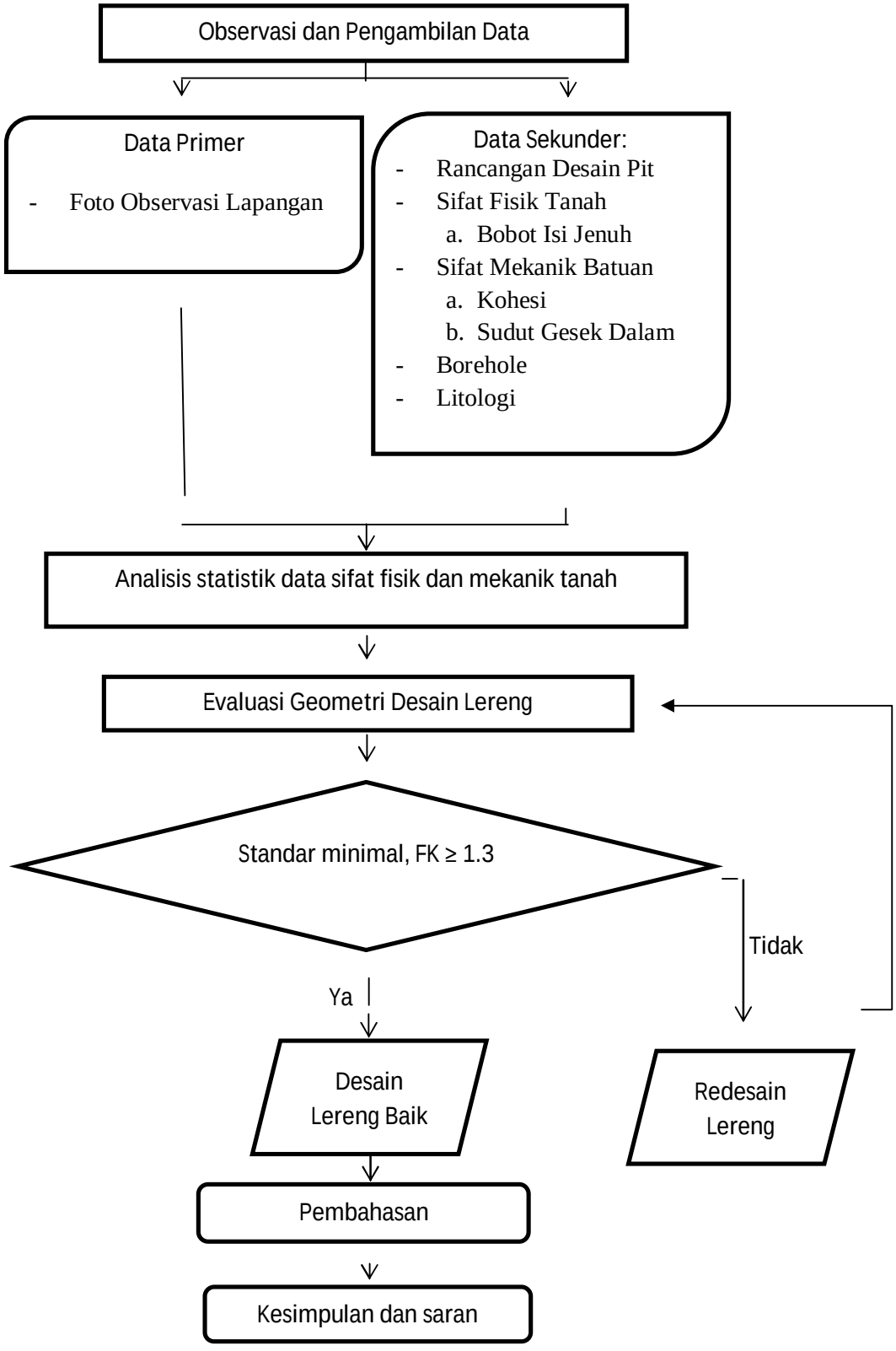
c) *Saprolite*

Material ini dimodelkan dengan kekuatan geser *undrained* (ϕ = 0). Nilai berat unitnya 18 kN/m^3. Dengan keadaan *undrained strength* (ϕ = 0) maka besarnya nilai kohesi sama dengan nilai kuat tanah tak terdrainase (Su = c). Material ini mempunyai *range* nilai kuat tanah tak terdrainase antara 80 - 130 kPa. Untuk penelitian ini digunakan nilai kuat tanah tak terdrainase (Su) sebesar 85 kPa.

d) *Bedrock / Blue Zone*

Material ini dimodelkan dengan bentuk *material model Impenetrable*. Yang merupakan material dasar, berdasarkan hasil uji lapangan, material ini merupakan lapisan terbawah sehingga tidak ada lagi lapisan setelahnya.

E. Bagang Alir Penelitian



Gambar 54. Diagram Alir Penelitian

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini merupakan bab yang akan menjelaskan tentang analisis stabilitas rencana lereng *B2C4 pit* berdasarkan data-data yang telah diperoleh dari Bab IV sebelumnya. Secara khusus bab ini merupakan petunjuk utama dalam menyimpulkan penelitian ini. Adapun hal-hal yang akan dilakukan dalam analisis ini yaitu :

a) Pemodelan rencana *B2C4 pit* secara dua dimensi (2D) menggunakan aplikasi SLOPE/W© 2007 berdasarkan data *critical cross section* yang diperoleh dari aplikasi Vulcan™ 7.5. Setelah itu menghitung Faktor Keamanan dari masing-masing *section* tersebut.
b) Memodifikasi geometri (*redesigning*) rencana *B2C4 pit* terhadap *section* yang memiliki nilai FK < 1,3 (tidak aman) sehingga didapatkan desain dengan nilai FK ≥ 1,3.
c) Penentuan geometri lereng yang *applicable* (dapat diterapkan di lapangan) setelah dilakukan analisa kestabilan lereng yang baru (*redesigning*).

A. Permodelan Desain Lereng pada *Section B2C4 pit*

Pemodelan yang dimaksud adalah membuat geometri mengikuti alur tampilan *critical cross section* perlapisan material pada *B2C4 pit* yang telah diperoleh dari aplikasi Vulcan™ 7.5 secara dua dimensi/2D (x,y) dengan menggunakan aplikasi SLOPE/W© 2007. Tampilan *section* ditransformasikan menjadi *region* berbentuk poligon tertutup yang

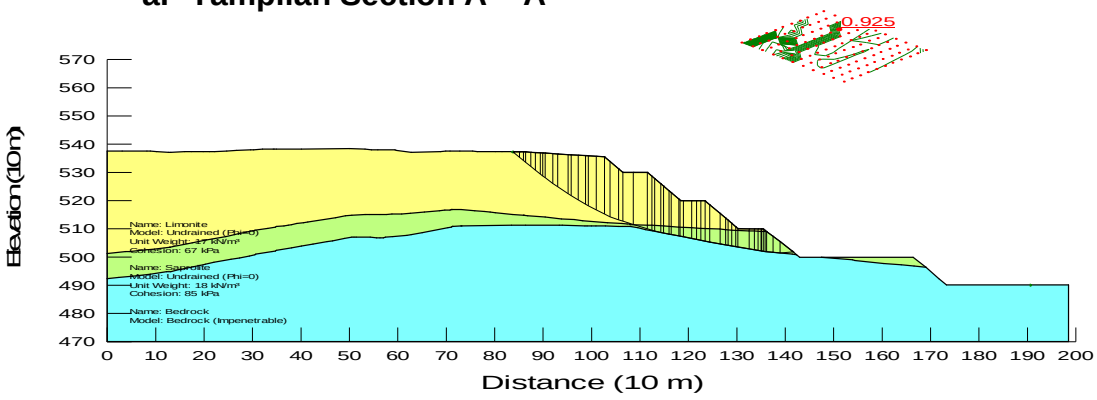
mewakili setiap perlapisan tanah sesuai dengan zona lapisan material yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah *region* terbentuk maka dilakukan *input* model kekuatan dan nilai karakteristik materialnya. Pemodelan material-material tersebut menyesuaikan dengan ciri khas/karakteristiknya masing-masing yang telah dijelaskan sebelumnya pada bagian akhir Bab IV sehingga perhitungan nilai Faktor Keamanan (FK) pada SLOPE/W© 2007 dapat dilaksanakan. Perlu ditekankan sebelumnya bahwa poin yang akan dijelaskan pada subbab ini hanyalah pemodelan berdasarkan desain *original* dan tidak termasuk *redesigning*. Pembahasan mengenai *redesigning* ini akan dijelaskan tersendiri pada subbab selanjutnya.

a. Section A – A'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +535,5 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 0.925. Hal ini dapat disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara

puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali)

a. Tampilan Section A – A'



Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

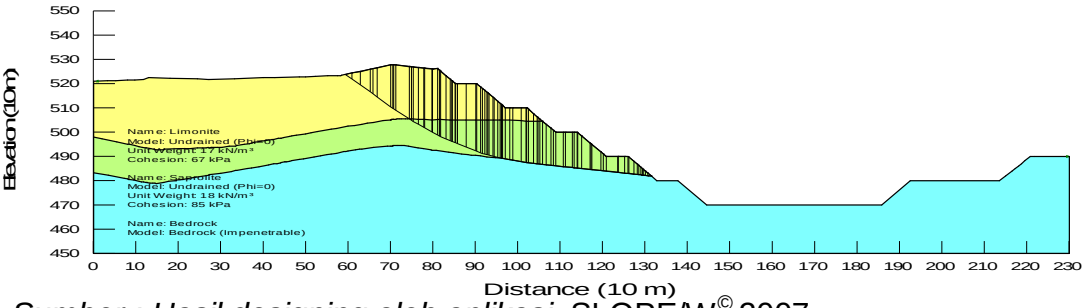
Gambar.55 Tampilan *model Section* A - A'

b. Section B – B'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +526 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan

terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 0,714. Hal ini dapat disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali).

b. Tampilan Section B – B'



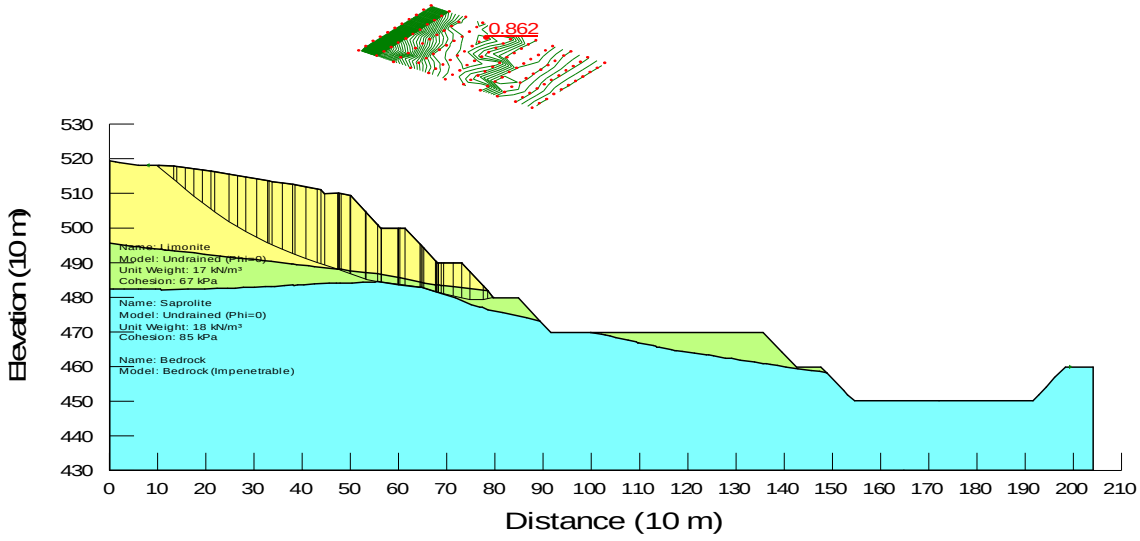
Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar.56 Tampilan *Section* B - B'Section C – C'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +512mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang

10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 0,862. Hal ini dapat disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali).

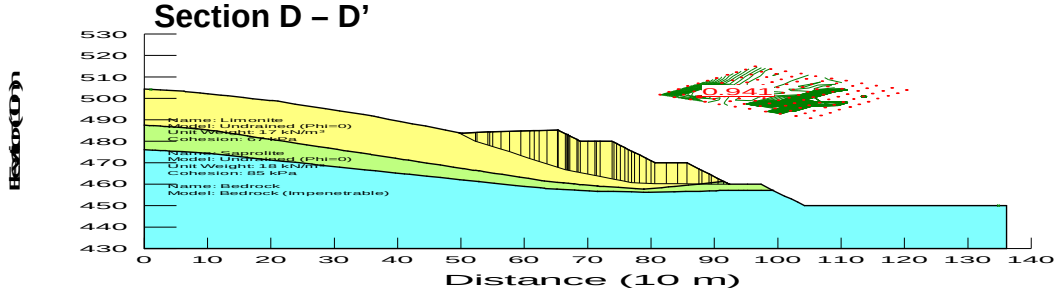
c. **Tampilan Section C – C**



Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar.57 Tampilan *Section* C – C'Section D – D'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +485,5 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 0,941. Hal ini dapat disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali). **Tampilan Section D – D'**

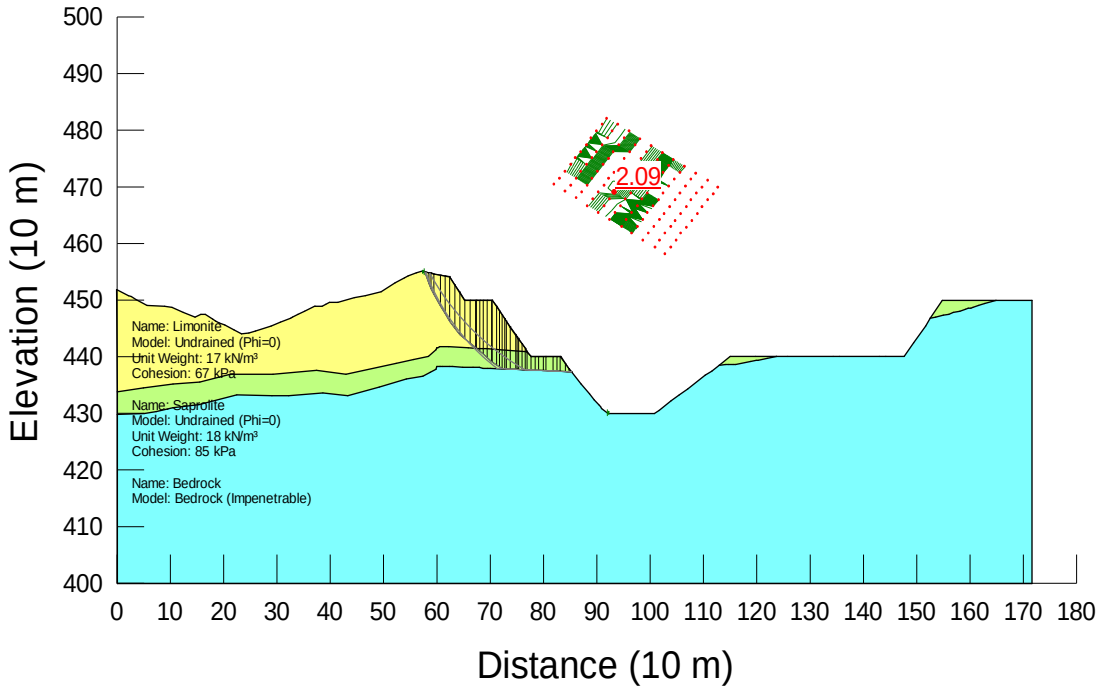


Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar.58 Tampilan *Section* D – D'

c. Section E – E'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +454 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 2,09. Karena nilai FK yang dihasilkan memenuhi persyaratan (FK ≥ 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada section ini direkomendasikan dan tidak perlu dilakukan *redesigning.* **Tampilan Section E – E'**



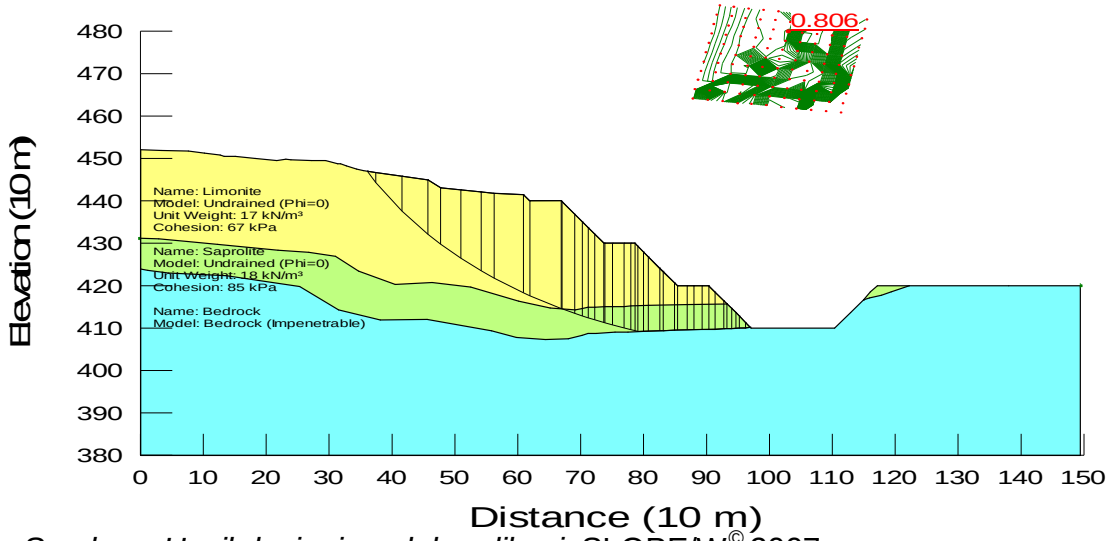
Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar.59 Tampilan *Section* E – E'

d. Section F – F'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +441,5 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 0,806. Hal ini dapat disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali).

Tampilan Section F – F'



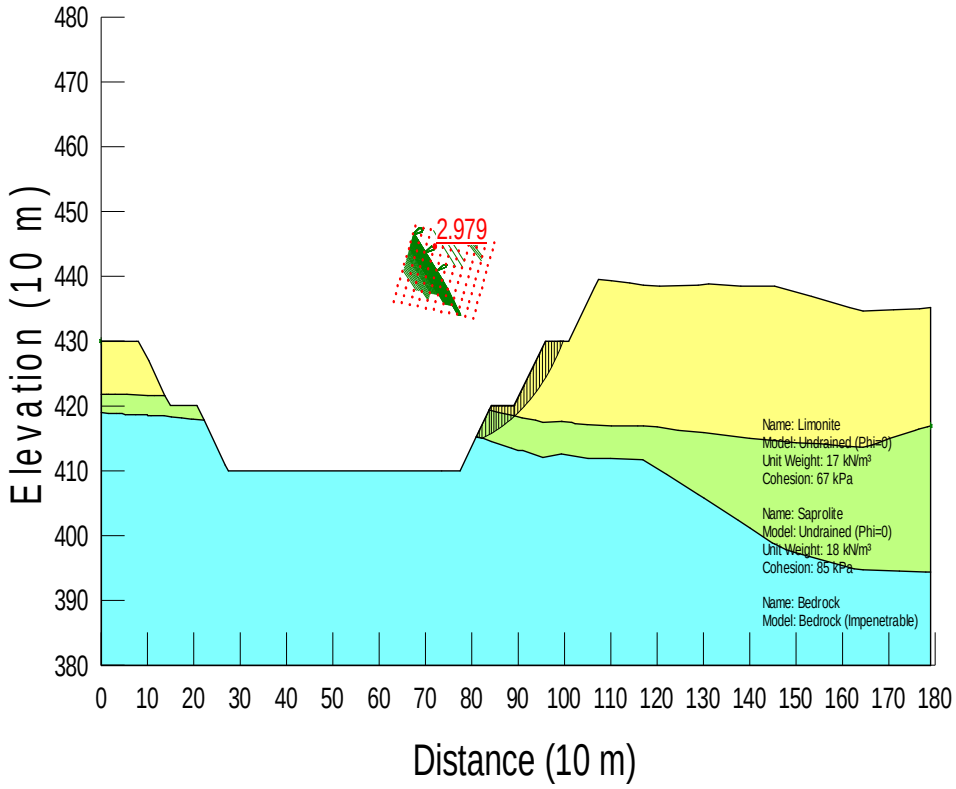
Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar. 60 Tampilan *Section* F – F'

e. Section G – G'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +439,5 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 2,979. Karena nilai FK yang dihasilkan memenuhi persyaratan (FK ≥ 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada section ini direkomendasikan dan tidak perlu dilakukan *redesigning.*

Tampilan Section G – G'



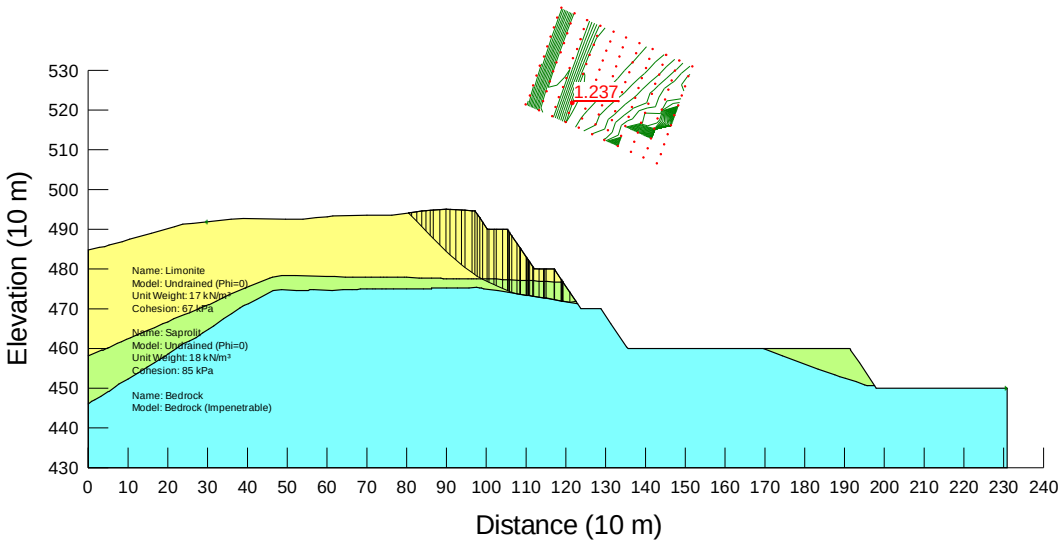
Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar. 61 Tampilan *Section* G – G'

f. Section H – H'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +494,5 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 1,237. Hal ini dapat

disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali). **Tampilan Section H – H'**



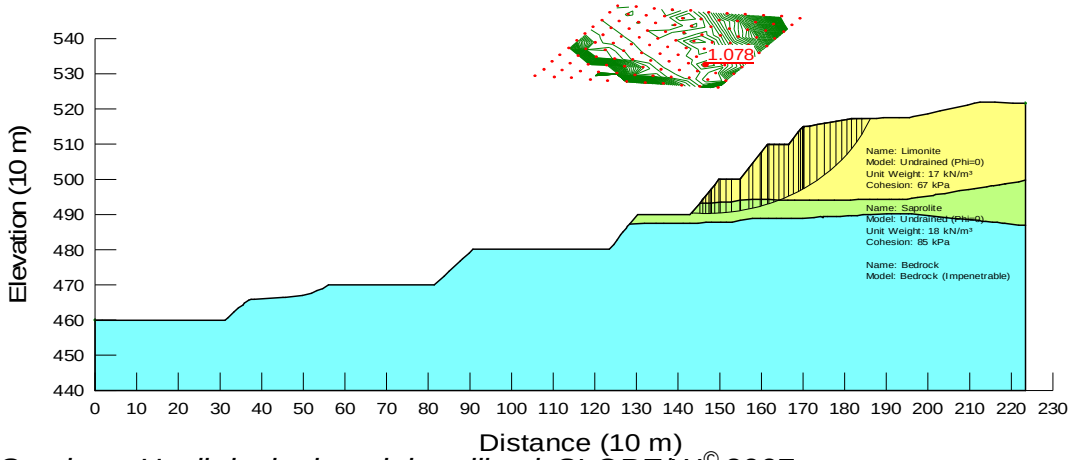
Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar. 62 Tampilan *Section* G – G'

g. Section I – I'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang

akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +514,75 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 1,078. Hal ini dapat disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali). **Tampilan Section I – I'**

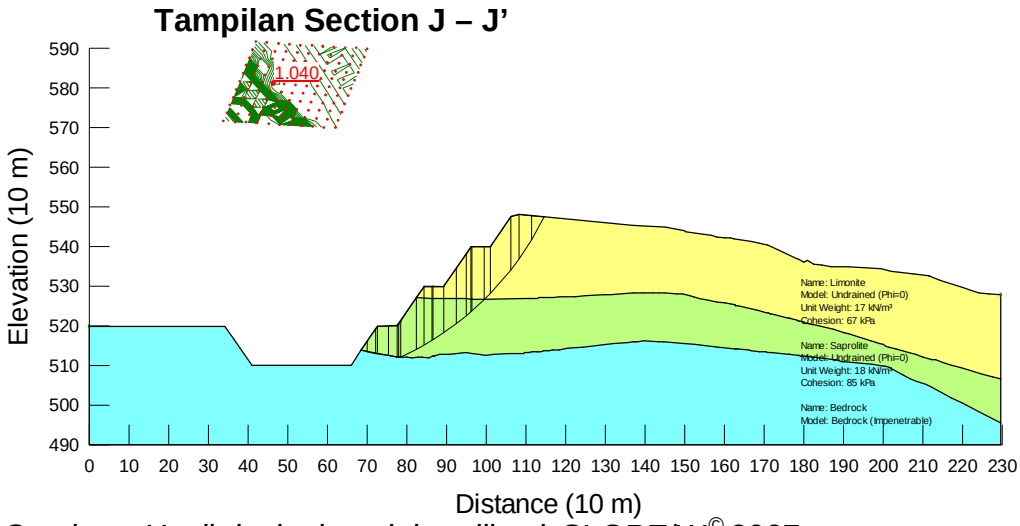


Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar. 63 Tampilan *Section* I – I'

h. Section J – J'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +548 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 1,040. Hal ini dapat disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali).



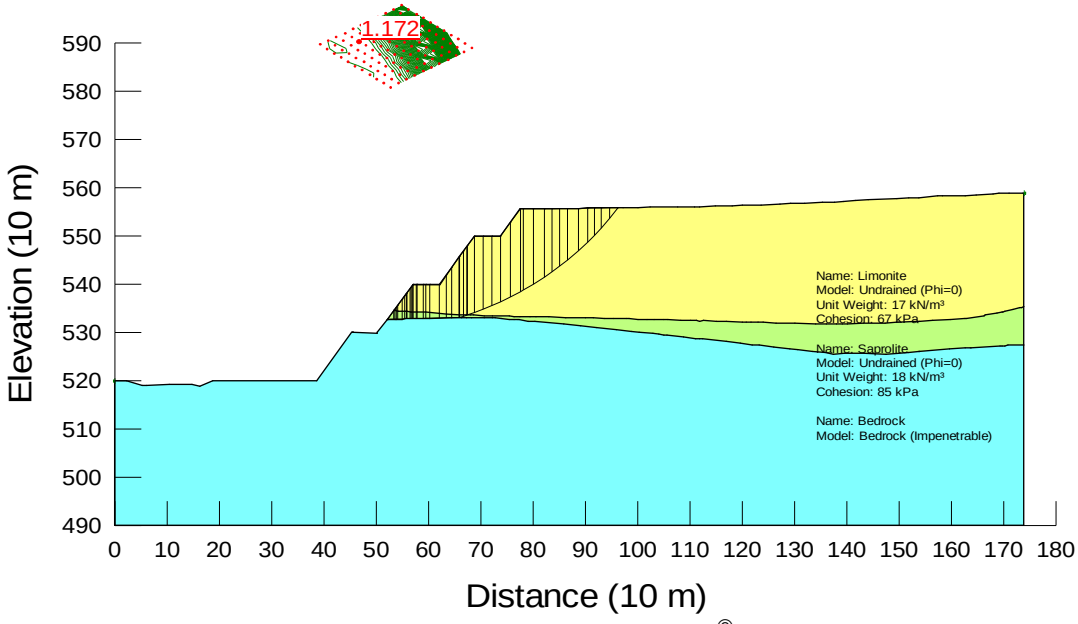
Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar. 64 Tampilan *Section* J – J'

i. Section K – K'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +555,5 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 1,172. Hal ini dapat disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang

tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali). **Tampilan Section K – K'**



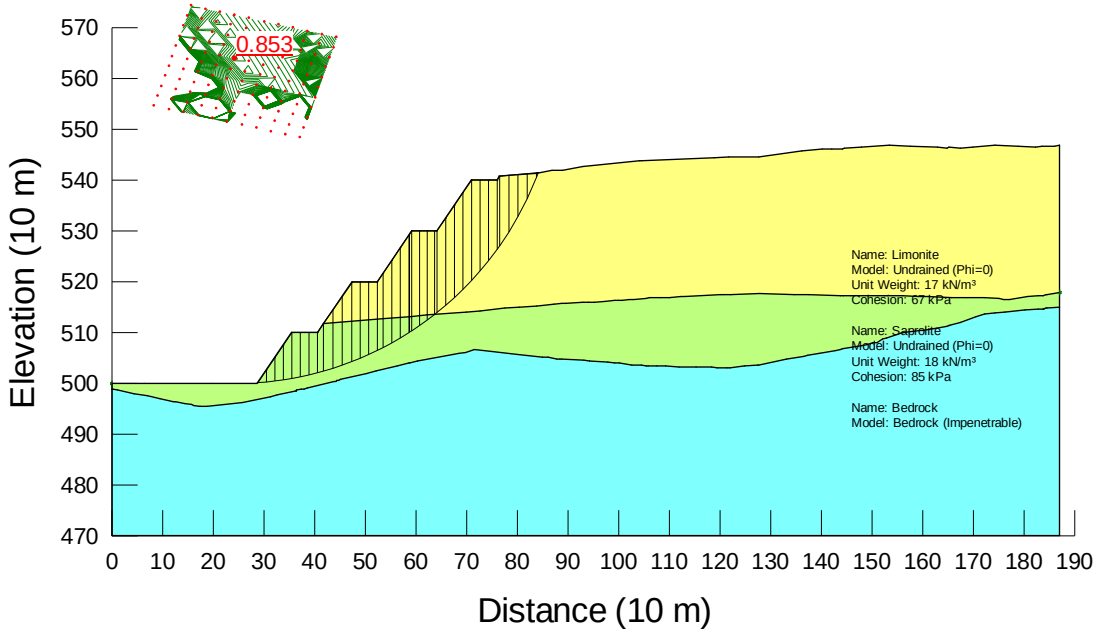
Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar.65 Tampilan *Section* K – K'

j. Section L – L'

Section ini dibuat dengan tujuan memperlihatkan penampang rencana *B2C4 pit* yang disayat mengikuti model *design B2C4 pit*. Untuk kepentingan *slope stability*, maka lereng inilah yang akan dianalisis stabilitasnya. Ketinggian *crest* desain lereng berada pada level +539 mdpl, sudut lereng 56 ^{o}, tinggi jenjang 10 m dan lebar jenjang (berm) 5 m. Berdasarkan hasil perhitungan SLOPE/W© 2007, nilai FK yang didapatkan

terhadap stabilitas lereng *B2C4 pit* adalah 0,853. Hal ini dapat disebabkan oleh elevasi desain lereng terlalu tinggi dan jarak horisontalnya terlalu jauh dari jalan akses. Untuk masalah elevasi, jika lereng terlalu tinggi dalam hal ini jarak antara puncak (*crest*) ke kaki (*toe*) menjadi besar, maka akan membuat lereng tersebut cenderung berada pada kondisi yang tidak aman. Karena nilai FK yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan (FK < 1,3), maka hal ini menandakan bahwa penerapan desain pada *section* ini tidak direkomendasikan dan perlu dilakukan *redesigning* (desain kembali). **Tampilan Section L – L'**



Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar. 66 Tampilan *Section* L – L'

B. Redesigning terhadap Desain Lereng pada *Section* yang Tidak Aman

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari pemodelan kestabilan lereng terhadap desain lereng pada *Section B2C4 pit* seperti yang telah dideskripsikan di atas, maka ada dua hal yang harus ditindaklanjuti, yakni :

1. Dari analisis semua *section* yang ada, *section* yang memperlihatkan hasil nilai FK yang aman dan memenuhi persyaratan, yakni E – E' dan G – G'
2. Dari analisis semua *section* yang ada, *section* yang memperlihatkan hasil nilai FK yang tidak aman dan tidak memenuhi persyaratan, yakni *Section* A – A', B – B', C – C', D – D' , F – F', H – H', I – I', J –J', K – K' dan L – L'.
3. Hal-hal yang dianggap menjadi penyebab sehingga nilai FK tidak memenuhi persyaratan pada semua *section* adalah elevasi lereng yang terlalu tinggi, sudut slope yang terlalu tegak dan jarak horisontal desain lereng yang terlalu pendek.

Ketiga hal di atas dapat disimpulkan mengarahkan analisis selanjutnya ke tindakan *redesigning*. *Redesigning* pada pembahasan ini adalah membuat desain kembali/memodifikasi geometri desain lereng yang telah ada sebelumnya dengan tujuan mengubah desain lereng yang tidak aman menjadi aman dengan cara-cara menurunkan elevasi lereng, memperlandai sudut slope dan

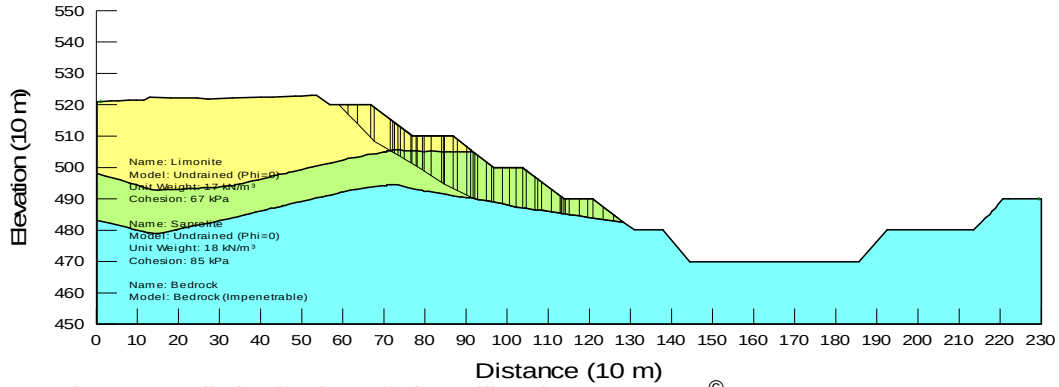
memundurkan jarak horisontal desain lereng (*pushback*). Berikut ini ditampilkan hasil *redesigning* terhadap semua *Section*. Perlu ditekankan disini bahwa *redesigning* yang dilakukan bukan menjadi desain final dari *B2C4 pit*, melainkan hanya sebagai desain temporer yang dapat dijadikan sebagai desain tahapan dalam konstruksi di lapangan (*stage reconstruction*) dan sebagai acuan dalam *geotechnical assessment* selanjutnya terhadap ` *pit* dalam rangka mewujudkan desain yang telah diajukan di awal jika memang memungkinkan untuk dapat diterapkan.

a. *Section* A – A' *Redesigning*

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

1. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 10 meter pada *Bench* level +510 mdpl hingga level +530 mdpl.





Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

Gambar. 67 Tampilan *Redesigning Section* A – A'

b. *Section* B – B' *Redesigning*

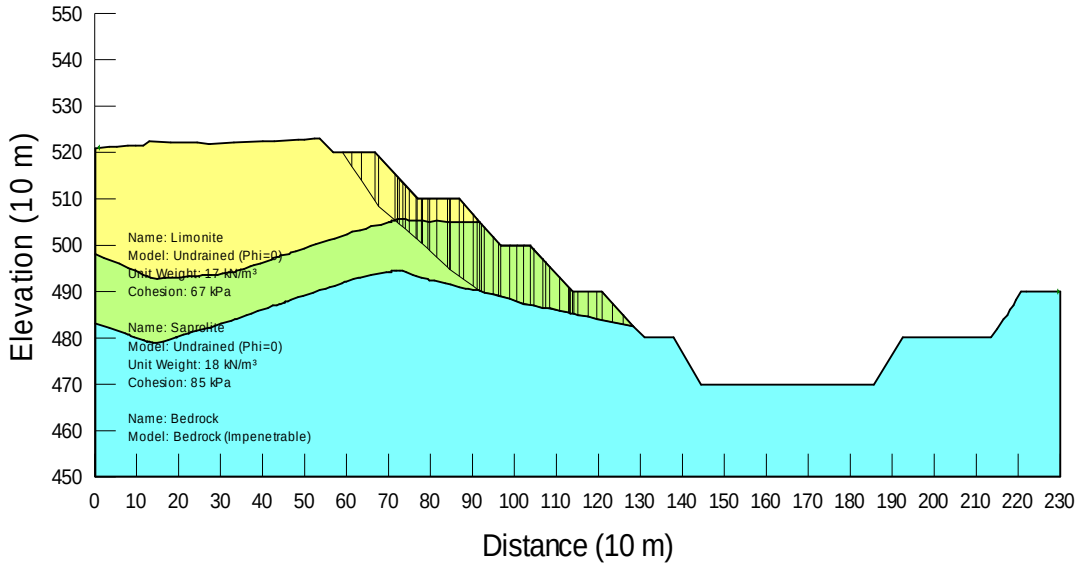
Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

a. Melandaikan *slope* 56^{o} menjadi 45^{o} pada semua *Bench.*

b. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 7 meter pada *Bench* yang berada pada level +510 mdpl hingga +520 mdpl. Dan pada level 480 mdpl

c. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 10 meter pada *Bench* yang berada pada level +490 mdpl hingga +500 mdpl





Sumber : Hasil designing oleh aplikasi SLOPE/W© 2007

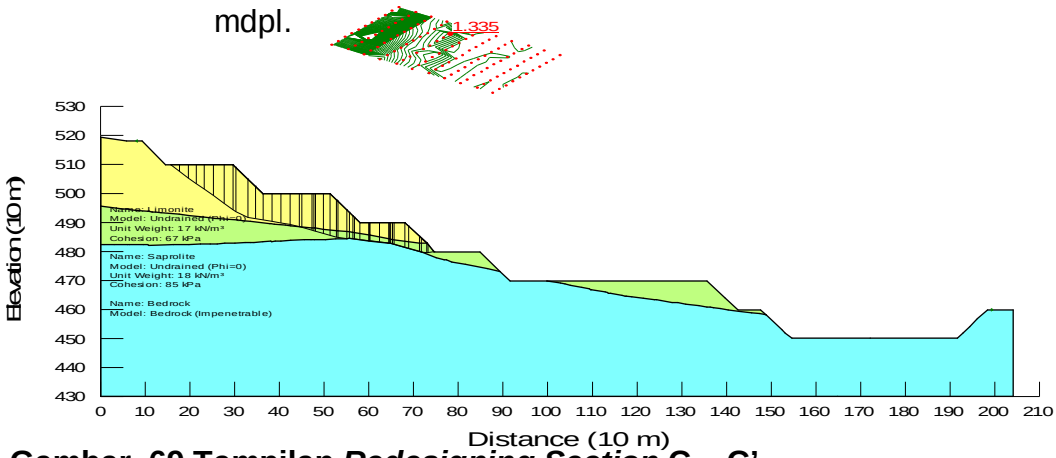
Gambar. 68 Tampilan *Redesigning Section* B – B'

c. *Section* C – C' *Redesigning*

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

1. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 10 meter pada *Bench* yang berada pada level +480 mdpl hingga +490 mdpl.

2. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 15 meter pada *Bench* yang berada pada level +500 mdpl hingga +510 mdpl.

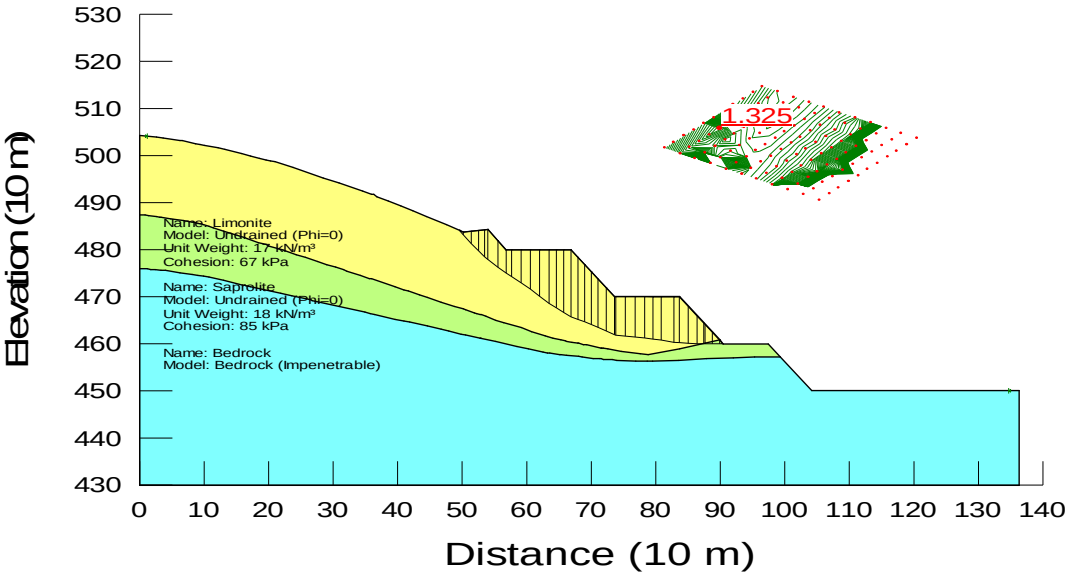


Gambar. 69 Tampilan *Redesigning Section* C – C'

d. *Section* D – D' *Redesigning*

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

1. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 7 meter pada *Bench* yang berada pada level +460 mdpl.
2. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 7 meter pada *Bench* yang berada pada level +470 mdpl hingga +480 mdpl .

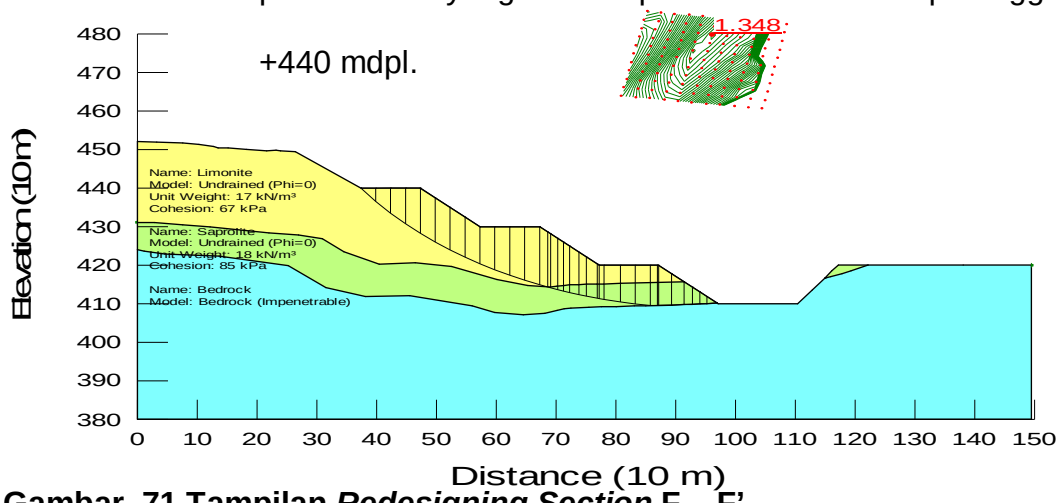


Gambar. 70 Tampilan *Redesigning Section* D – D'

e. *Section* F – F' *Redesigning*

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

1. Melandaikan *slope* 56^{o} menjadi 45^{o} pada *Bench* yang berada pada level +410 mdpl hingga +450 mdpl.
2. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 10 meter pada *Bench* yang berada pada level +420 mdpl hingga +440 mdpl.

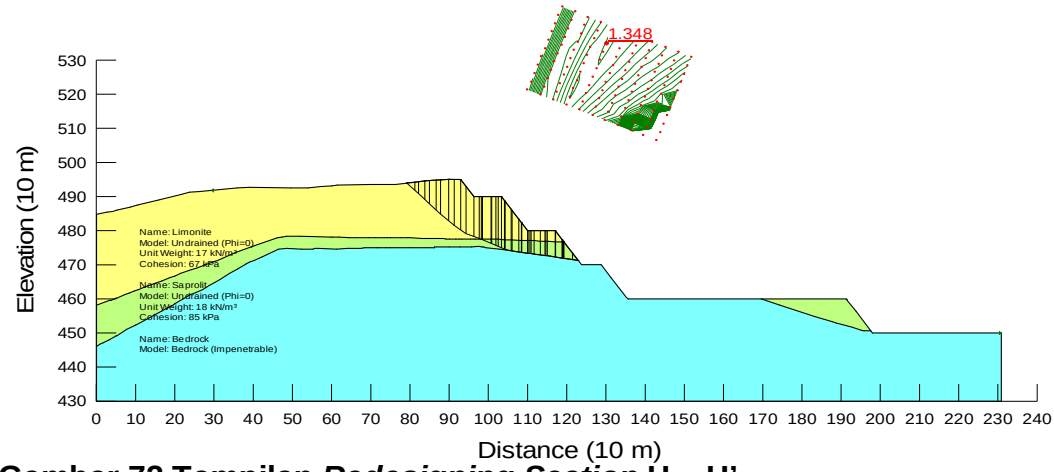


Gambar. 71 Tampilan *Redesigning Section* F – F'

f. *Section* H – H' *Redesigning*

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

1. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 7 meter pada *Bench* yang berada pada level +470 mdpl dan +490 mdpl.

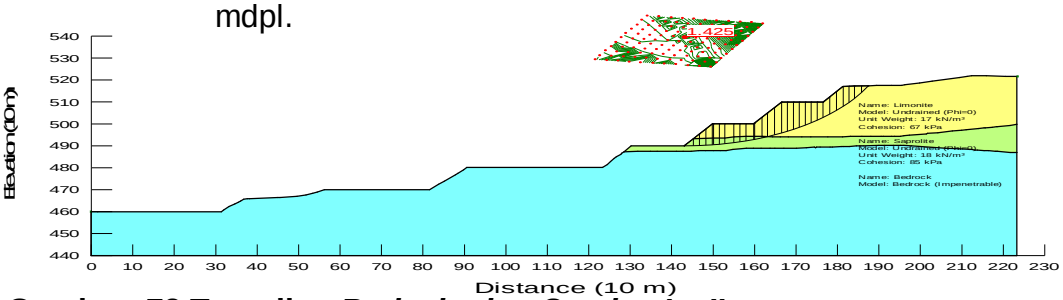


Gambar.72 Tampilan *Redesigning Section* H – H'

g. *Section* I – I' *Redesigning*

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

1. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 10 meter pada *Bench* yang berada pada level +500 mdpl hingga +510 mdpl.

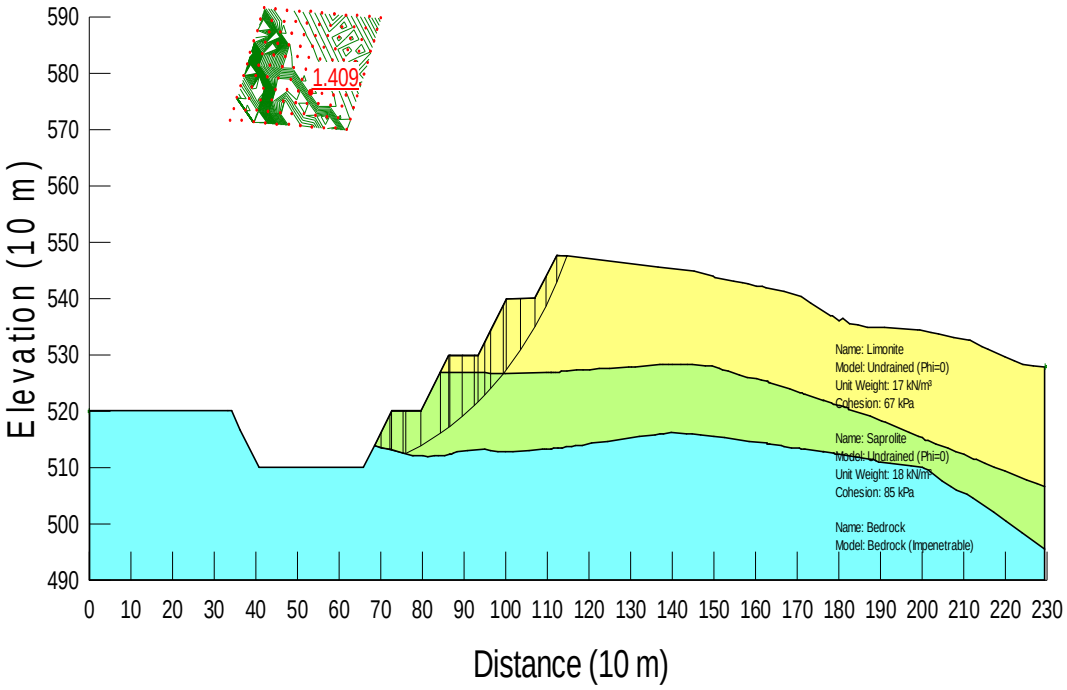


Gambar. 73 Tampilan *Redesigning Section* I – I'

h. *Section* J – J' *Redesigning*

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

1. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 7 meter pada *Bench* yang berada pada level +520 mdpl hingga +540 mdpl.

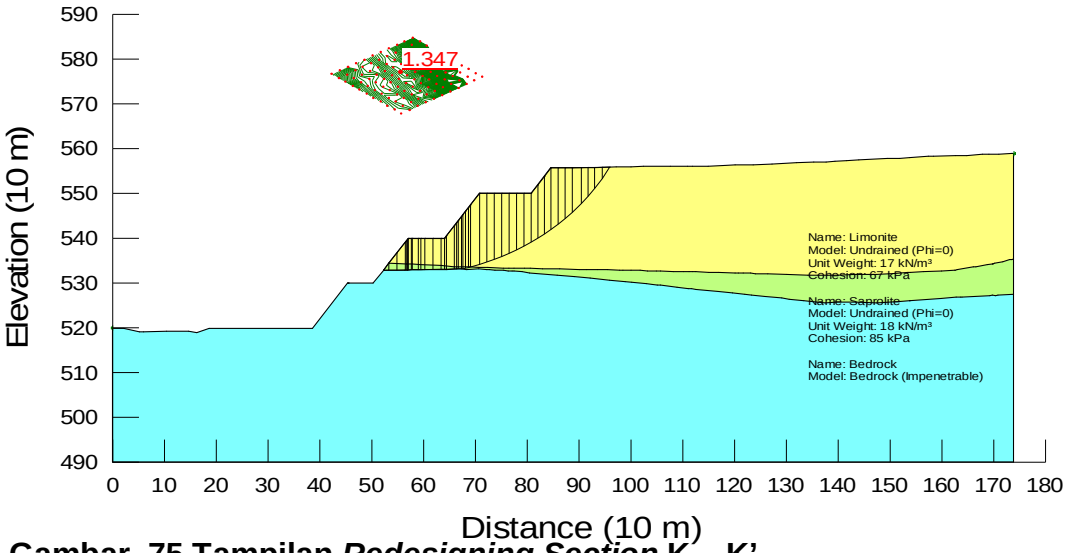


Gambar. 74 Tampilan *Redesigning Section* J – J'

i. *Section* K – K' *Redesigning*

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

1. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 7 meter pada *Bench* yang berada pada level +540 mdpl.
2. Memperpanjang berm dari 5 meter menjadi 10 meter pada *Bench* yang berada pada level +550 mdpl.

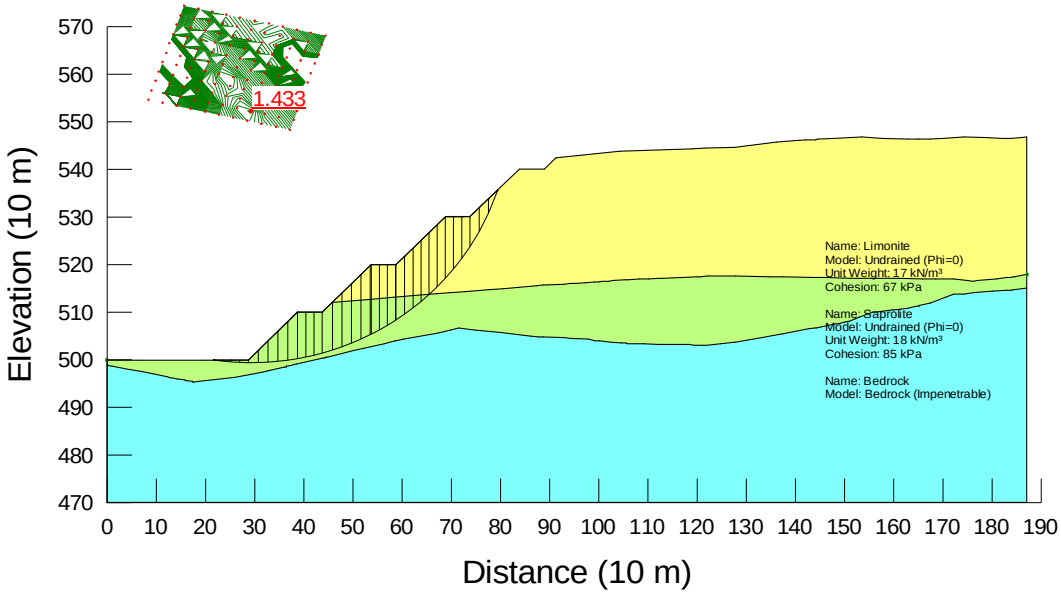


Gambar. 75 Tampilan *Redesigning Section* K – K'

j. *Section* L – L' *Redesigning*

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, maka dilakukan beberapa langkah modifikasi desain, yakni :

1. Melandaikan semua *slope* 56^{o} menjadi 45^{o} pada masing-masing *Bench.*



Gambar. 76 Tampilan *Redesigning Section* L – L'

C. Evalusai Kestabilan Lereng Kondisi Awal dan Sesudah *Redesigning*

Berdasarkan hasil *Redesigning* yang telah Penulis lakukan, didapatkan data informasi *detail* geometri lereng dari masing-masing section. yang terdapat pada table 5.1 berikut ini.

Section	Bench	Level (mdpl)		Berm (m)		Slope (°)		FS	
		Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
A - A'	1	535.5	537	-	-	56	56	0.925	1.431
	2	530	530	5	10	56	56		
	3	520	520	5	10	56	56		
	4	510	510	5	10	56	56		
	5	500	500	23.5	23.5	56	56		
B - B'	1	526	523	-	-	56	45	0.714	1.344
	2	520	520	5	7	56	45		
	3	510	510	5	7	56	45		
	4	500	500	5	10	56	45		
	5	490	490	5	10	56	45		
	6	480	480	5	7	56	56		
C - C'	1	511	518	-	-	56	56	0.862	1.335
	2	510	510	5	15	56	56		
	3	500	500	5	15	56	56		

	4	490	490	5	10	56	56		
	5	480	480	5	10	56	56		
	6	470	470	44	44	56	56		
	7	460	460	5	5	56	56		
D - D'	1	485	484	-	-	56	56	0.941	1.325
	2	480	480	5	10	56	56		
	3	470	470	5	10	56	56		
	4	460	460	5	7	56	56		
E - E'	1	454	454	-	-	56	56	2.09	2.09
	2	450	450	5	5	56	56		
	3	440	440	5	5	56	56		
F - F'	1	441.5	449.5	-	-	56	45	0.806	1.348
	2	440	440	5	10	56	45		
	3	430	430	5	10	56	45		
	4	420	420	5	10	56	45		
G - G'	1	439.5	439.5	-	-	56	56	2.979	2.979
	2	430	430	5	5	56	56		
	3	420	420	5	5	56	56		
H - H'	1	494.5	495	-	-	56	56	1.237	1.348
	2	490	490	5	7	56	56		

	3	480	480	5	7	56	56		
	4	470	470	5	5	56	56		
	5	460	460	55.5	55.5	56	56		
I - I'	1	515	517	-	-	56	56	1.078	1.425
	2	510	510	5	10	56	56		
	3	500	500	5	10	56	56		
	4	490	490	13	13	56	56		
	5	480	480	33	33	56	56		
J - J'	1	547.5	547.8	-	-	56	56	1.04	1.409
	2	540	540	5	7	56	56		
	3	530	530	5	7	56	56		
	4	520	520	5	7	56	56		
K - K'	1	555.5	555.5	-	-	56	56	1.172	1.347
	2	550	550	5	10	56	56		
	3	540	540	5	7	56	56		
	4	530	530	5	5	56	56		
L - L'	1	541	542.5	-	-	56	45	0.853	1.433
	2	540	540	5	5	56	45		

	3	530	530	5	5	56	45		
	4	520	520	5	5	56	45		
	5	510	510	5	5	56	45		

Tabel.1 Evaluasi Kestabilan Lereng

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Setelah melakukan berbagai kegiatan pada saat Tugas Ahir, membuat penulis menjadi lebih tahu mengenai masalah geoteknik yang terjadi pada daerah pertambangan, khususnya pada lokasi *B2C4 Pit***.** Analisis stabilitas rencana lereng *pit* dalam *geotechnical assessment* merupakan kunci utama untuk mewujudkan konstruksi *pit* yang *applicable* (dapat diterapkan saat di lapangan) dan aman terkait *concern* terhadap *safety issue* pada area operasi penambangan PT Vale Indonesia Tbk. Secara umum, hal ini dilakukan dengan tujuan mendukung suksesnya keseluruhan rangkaian operasi penambangan agar dapat berlangsung dengan aman. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

7. Lereng *B2C4 pit* dianalisa dengan kondisi *undrained shear strength*, karena kondisi tersebut merupakan kondisi jenuh total sehingga nilai FK merupakan nilai yang kritis.
8. Desain model awal *B2C4 pit* dengan penampang melintang E – E’ dan G – G’ memenuhi kriteria faktor keamanan (direkomendasikan) dari suatu lereng (FK ≥1,3), maka tidak perlu dilakukan modifikasi/*redesigning* pada geometri lereng tersebut.

9. Desain model awal *B2C4 pit* dengan penampang melintang A – A', B – B', C – C', D – D', F – F', H – H', I – I', J –J', K – K' dan L – L'tidak memenuhi kriteria faktor keamanan (tidak direkomendasikan) dari suatu lereng (FK<1,3), maka perlu dilakukan modifikasi/*redesigning* pada geometri lereng tersebut.
10. Modifikasi (*redesigning*) dilakukan dengan memundurkan batas pit (pit limit) dan melandaikan sudut dari masing-masing *bench* lereng pada desain lereng awal, sehingga desain pit awal menjadi lebih luas.
11. Perolehan nilai FK setelah dimodifikasi dengan Slope-W© 2007 memenuhi kriteria faktor keamanan yang telah ditetap kan PTVI, yaitu FK≥1,3.
12. Nilai FK minimum yang didapatkan dari hasil analisis stabilitas lereng adalah 1,325 sedangkan nilai FK maksimum adalah 2,979 dengan menggunakan Slope-W© 2007.
13. FK rata-rata *(average Factor of Safety)* secara keseluruhan dari rekomendasi desain rencana lereng *B2C4 pit* setelah dilakukan *redesigning* ialah 1,347. Artinya, rekomendasi desain lereng tersebut dapat diterapkan di lapangan (*applicable*).

B. Saran

a) Mematuhi rekomendasi geotek terhadap rekomendasi geometri lereng sangatlah penting untuk menghindari potensi kegagalan lereng (kelongsoran).

b) Pemantauan / inspeksi setiap harinya sangat diperlukan, supaya lereng selalu tetap berada dalam geometri yang disarankan (sesuai plan) dan aman untuk masing-masing area. Jika aktual tidak sesuai plan yang disarankan, memungkinkan Faktor Keamanan berkurang dan dapat terjadi kelongsoran.

DAFTAR PUSTAKA

Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., & Boyce, G.M. 2002. *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: John Wiley & Sons.

Ahmad, Waheed. 2005. *Laterite: Fundamental of Chemistry, Mineralogy, Weathering Process and Laterite Formation*. Sorowako: PT International Nickel Indonesia.

Azizi, M.A., dkk. 2012. *Analisis Risiko Kestabilan Lereng Tambang Terbuka.* Prosiding Simposium Dan Seminar Geomekanika Ke-1.

Azizi, M.A. 2014. *Pengembangan Metode Penentuan Reliabilitas Kestabilan Lereng Tambang Terbuka Batubara di Indonesia.* Disertasi. Instititut TeknologiBandung.

Bemmelen, van, R.W. 1949. *The Geology of Indonesia*. Netherland: The Haque

Blasio, F.V. 2011. *Introduction to the Physics of Landslides*. New York: Springer Science+Business Media.

Bowles, Joseph E. 2000. *Analisis dan Desain Pondasi Jilid 5*. Jakarta: Penerbit Erlangga.

Coffield, D.Q.; dkk. 1993. *Tectonic and Stratigraphic Evolution of the Kalosi PSC Area and Associated Development of a Tertiary Petroleum System, South Sulawesi, Indonesia*. Indonesia: Proceeding Indonesian Petroleum Association 22nd Annual Convention

Das, B.M., Endah, N., Mochtar, I.B. 1988. *"Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)" Jilid 1*. Jakarta: Penerbit Erlangga.

Das, B.M., Endah, N., Mochtar, I.B. 1993. *"Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)" Jilid 2*. Jakarta: Penerbit Erlangga.

Das, B.M. 2002. *Soil Mechanics Laboratory Manual (6th edition)*. Oxford: Oxford University Press Inc.

Elias, M. 2001. *Nickel Laterite Deposits – Geological Overview, Resources and Exploitation*. Australia: CSA Australia.

Golightly, P.J. 1979. *Nikeliferous Laterite: A General Description. International Laterite Symposium*. Canada: Inco Metals Company.

Hall, Robert. 1995. *Plate Tectonic Reconstructions of the Indonesian Region.* Indonesia: Proceeding Indonesian Petroleum Association

Hamilton, W. 1979. *Tectonics of the Indonesian Region*. Washingtion D.C.: USGS Professional Paper

Hardiyatmo H.C. (c). 2006. *Penanganan Tanah Longsor dan Erosi*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Hoek, E. & J. W. Bray. 1981. *Rock Slope Engineering*, Revised Third Edition. London: The Institution of Mining and Metallurgy.

Hustrulid, W. & Kuchta, M. 1995. *Open Pit Mine Planning & Design, Vol. 1*, A.A. Balkema, Rotterdam.

Hutchison, C.S. 2008. *Geological Evolution of South East Asia*. Malaysia: Geological Society of Malaysia

Katili, J.A. 1979. *Complication of Cenozoic Tectionic Development in Eastern Indonesia*. Washington D.C.: American Geophysical Union.

Morgenstern, N.R. & Price, V.E. 1965. *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces*. London: The Institution of Civil Engineers.

Purwanto, Edi. 2002. *Diktat Perencanaan Tambang Terbuka*. Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Teknologi Mineral dan Batubara.

Read. J & Stacey. P. 2009. *Open Pit Slope Design*. Australia: CSIRO Publishing.

Sapiie, B & Agus H.H. 2012. *Prinsip Dasar Geologi Struktur*. Bandung: Penerbit ITB

Steffen, dkk. 2008. *A Risk Evaluation Approach for Pit Slope Design.* Johanessburg: SRK consulting.

Silver, E.A., Mc. Caffrey, R., dan Smith, R.B. 1983b*. Collision, rotation and initiation of subduction in the evolution of Sulawesi, Indonesia.*Journal of Geophysics Research*.*

Soedarmo, G. Djatmiko dan S. J. Edy Purnomo. 1997. Mekanika Tanah 2. Yogyakarta: Kanisius.

Simandjuntak, T.O. 1992. *An Outline of Tectonics of the Indonesian Region*. *Geological New Letters*. Bandung: Geological Research and Development Center.

Simandjuntak, T.O. 1996. *Contrasting Tectonic Styles in the Neogene Orogenic Belt of Indonesia. In: Hall, R. and Blundell, D., (Eds.), Tectonic Evolution of Southeast Asia.* Bandung: Geological Society Special Publication.

Simandjuntak, T.O., Rusmana, E., Surono, dan Supandjoono, J.B. 1991. *Geology of The Malili Quadrangle, Sulawesi*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi, Departemen Mineral dan Energi.

Simandjuntak, T.O. dan Barber, A.Y. 1996. *Contrasting tectonic styles in the Neogene orogenic belts of Indonesia. In: Hall, R and Blundell,*

D. (eds.), Tectonic Evolution of Southeast Asia. Bandung: Geological Society Special Publication.

Sukamto, R. 1975. *Peta Geologi Indonesia Lembar Ujungpandang, Skala 1: 1.000.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi

Sukamto, R. 1975. *The structure of Sulawesi in the Light of Plate Tectonics. Paper presented in the Regional Conference of Geology and Mineral Resources, Southeast Asia*, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Sukamto, R. dan Simandjuntak, T.O. 1983. *Tectonic relationship between geologic provinces of Western Sulawesi, Eastern Sulawesi and Banggai-Sula in the light of sedimentological aspects*. Jakarta: Indonesian Geological Research Development Centre.

Tjia, H.D. dan Zakaria, T.H. 1974. *Palu-Koro strike-slip fault zone, Central Sulawesi*. Malaysia.

Zang, A. 2012. *Mohr-Coulomb Failure Criterion*. Potsdam: GFFZ German Research Centre for Geosciences.