

LAPORAN TUGAS AKHIR

PROGRAM ANALISIS STABILITAS LERENG

SLOPE STABILITY ANALYSIS PROGRAM

Diajukan untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan Tingkat Sarjana (S1) pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang



Disusun Oleh :

SUSI HIDAYAH

L2A 003 138

YOHAN ROY GRATIA

L2A 003 152

JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS DIPONEGORO

SEMARANG

2007

LEMBAR PENGESAHAN

PROGRAM ANALISIS STABILITAS LERENG

Slope Stability Analysis Program

Disusun Oleh :

SUSI HIDAYAH L2A 003 138

YOHAN ROY GRATIA L2A 003 152

Disetujui Oleh,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. NUROJI, MS.

NIP 131 962 227

Ir. MUHROZI, MS.

NIP 131 672 478

Mengetahui,
Ketua Jurusan Sipil
Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Ir. BAMBANG PUDJIANTO, MT.

NIP. 131.459.442

ABSTRAK

Lereng merupakan suatu kondisi topografi yang banyak dijumpai pada berbagai pekerjaan konstruksi sipil. Lereng dapat terjadi secara alami maupun sengaja dibuat oleh manusia dengan tujuan tertentu. Analisis stabilitas lereng mempunyai peran yang sangat penting pada perencanaan konstruksi-konstruksi sipil. Kondisi tanah asli yang tidak selalu sesuai dengan perencanaan yang diinginkan misalnya lereng yang terlalu curam sehingga dilakukan pekerjaan pemotongan bukit atau kondisi lain yang membutuhkan timbunan dan lain sebagainya, sehingga diperlukan analisis yang lebih akurat agar diperoleh konstruksi lereng yang mantap (sesuai dengan syarat keamanan).

Untuk mendapatkan suatu nilai faktor keamanan minimum dari suatu analisis stabilitas lereng memerlukan suatu proses *trial and error*. Pada proses iterasi yang dilakukan secara manual akan memakan waktu yang cukup lama dan diperlukan ketelitian. Proses analisis yang cukup lama dan kurang akurat dapat diminimalisir dengan menggunakan suatu program (*software*) yang dapat digunakan untuk menganalisis permasalahan stabilitas lereng di atas.

Dengan **Program Analisis Stabilitas Lereng V 1.0**, proses *trial and error* dapat dilakukan secara lebih cepat daripada dilakukan perhitungan secara manual sehingga didapatkan angka factor keamanan minimum secara akurat dengan selisih rata-rata 1.57% jika dibandingkan dengan validasi manual.

Kata kunci : stabilitas lereng, *trial and error*, faktor keamanan kritis.

ABSTRACT

The slope is a topography condition which has been seen in many civil construction works. The slope can occur naturally or be made by people for several purposes. The slope stability analysis has very important roles at civil construction plan. Where the condition of existing land were not always agree with our plan, for example: if the slope is too steep so it requires to be cut then need to do cutting works, or the other condition we need to do requiring hoard and so on, so that needed more accurate analysis to get a stable slope construction (according to safety requirement).

To get a minimum safety factor value from slope stability analysis, needs a trial and error process. In trial and error process manually, an analysis needs a long time and a high accuracy. The sufficient analyze can be reduced by using a software.

*For doing trial and error can be faster with use **Slope Stability Analysis Program V 1.0**, than manual one then can get a minimum safety factor accurately with 1.57% difference comparison with manual validation.*

Key words : slope stability, trial and error, critical safety factor

KATA PENGANTAR

Pertama-tama kami panjatkan puji dan syukur ke hadirat Tuhan YME, karena dengan rahmat dan karunia-Nya, kami dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul **Program Analisis Stabilitas Lereng** ini dengan baik dan lancar.

Tugas akhir ini merupakan mata kuliah wajib yang harus ditempuh dalam rangka menyelesaikan pendidikan kesarjana Strata I di Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Diponegoro Semarang, mata kuliah Tugas Akhir mempunyai bobot 4 SKS. Melalui penyusunan tugas akhir ini mahasiswa diharapkan mampu mempunyai daya analisa yang tajam serta membantu memperdalam ilmu yang telah diperoleh selama masa kuliah.

Dalam penyelesaian Laporan Tugas Akhir ini penulis dibantu oleh berbagai pihak. Dengan penuh rasa hormat, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua tercinta untuk semua doa, dukungan moral dan material yang tidak ternilai harganya.
2. Yang terhormat Ir. Bambang Pudjianto, MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro.
3. Yang terhormat Dr. Ir. Nuroji, MS. selaku dosen pembimbing 1 yang telah memberikan bimbingannya hingga selesainya Laporan Tugas Akhir ini.
4. Yang terhormat Ir. Muhrozi, MS. selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan bimbingannya hingga selesainya Laporan Tugas Akhir ini.
5. Yang terhormat Ir. Rudi Yuniarto Adi selaku dosen wali 2152.
6. Kawan-kawan lainnya atas bantuan kuliahnya serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Kami menyadari bahwa dalam penulisan ini masih banyak kekurangan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu saran dan kritik sangat diharapkan untuk penyempurnaan Laporan Tugas Akhir ini.

Akhir kata, penulis berharap semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi perkembangan penguasaan ilmu rekayasa sipil di Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro.

Semarang, Agustus 2007

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	I-1
1.2. Tujuan dan Manfaat	I-1
1.3. Batasan Masalah	I-2
1.4. Sistematika Penulisan	I-2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Stabilitas Lereng	II-1
2.2. Parameter Tanah/Batuan	II-3
2.2.1. Angka Keamanan.....	II-5
2.2.2. Analisis Stabilitas Lereng	II-8
2.2.2.1. Prosedur Massa (<i>Mass Procedure</i>)	II-8
2.2.2.1.1. Stabilitas Lereng pada Tanah Lempung Homogen dengan $\varphi = 0$	II-8
2.2.2.1.2. Stabilitas Lereng pada Tanah Homogen c' - φ'	II-11
2.2.2.2. Metode Irisan (<i>Method of Slice</i>).....	II-13
2.2.2.2.1. Fellenius	II-16
2.2.2.2.2. Bishop	II-18
2.2.2.2.3. Janbu	II-19

2.3. Analisis Numerik	II-20
2.3.1. Integrasi Numerik	II-20
2.3.1.1. Pendekatan Cara Persegi.....	II-21
2.3.1.2. Pendekatan Cara Trapezoidal	II-22
2.3.2. Persamaan Taklinier.....	II-23
2.3.2.1. Metode Bagidua (<i>Bisection</i>)	II-23

BAB III METODOLOGI

3.1 Alur Program (<i>Flowchart</i>)	III-1
3.2 Penjelasan Alur Program	III-3

BAB IV VALIDASI PROGRAM

4.1. Validasi Program dengan Hasil Perhitungan Teoritis.....	IV-1
4.2. Pembahasan Hasil Validasi Program	IV-8

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan	V-1
5.2. Saran	V-1

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Kelongsoran lereng	II-1
Gambar 2.2.	Bentuk-bentuk keruntuhan lereng	II-3
Gambar 2.3.	Kekuatan geser tanah/batuan	II-4
Gambar 2.4.	Keseimbangan benda pada bidang miring	II-5
Gambar 2.5.	Analisis stabilitas lereng pada tanah lempung yang homogen $\phi = 0$	II-9
Gambar 2.6.	Analisis stabilitas lereng pada tanah homogen $c'-\phi'$	II-12
Gambar 2.7.	Permukaan bidang yang dicoba	II-15
Gambar 2.8.	Gaya yang bekerja pada irisan nomor n.....	II-15
Gambar 2.9.	Analisis stabilitas lereng dengan metode irisan untuk lereng pada tanah yang berlapis	II-16
Gambar 2.10.	Sistem gaya pada cara Fellenius	II-17
Gambar 2.11.	Gaya-gaya yang bekerja pada irisan tunggal	II-18
Gambar 2.12.	Suatu gaya pada suatu elemen menurut Bishop.....	II-19
Gambar 2.13.	Penyelesaian eksak – integral.....	II-21
Gambar 2.14.	Pendekatan cara persegi	II-21
Gambar 2.15.	Pendekatan cara trapezoidal.....	II-22
Gambar 2.16.	Algoritma metode bagidua.....	II-24
Gambar 3.1.	Gambar pendekatan teknis lereng	III-3
Gambar 3.2.	Menentukan daerah pusat rotasi.....	III-4
Gambar 3.3.	Batasan menentukan jari-jari 1.....	III-5
Gambar 3.4.	Batasan menentukan jari-jari 2.....	III-5
Gambar 3.5.	Batasan menentukan jari-jari 3.....	III-6
Gambar 4.1.	Kasus stabilitas lereng 1	IV-2
Gambar 4.2.	Kasus stabilitas lereng 2.....	IV-3
Gambar 4.3.	Kasus stabilitas lereng 3	IV-4
Gambar 4.4.	Kasus stabilitas lereng 4.....	IV-5
Gambar 4.5.	Kasus stabilitas lereng 5.....	IV-6
Gambar 4.6.	Kasus stabilitas lereng 6.....	IV-7

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Faktor keamanan minimum kemantapan lereng	II-7
Tabel 4.1.	Hasil analisis stabilitas lereng teoritis, program FK manual, program FK minimum dan perhitungan manual kasus 1	IV-2
Tabel 4.2.	Hasil analisis stabilitas lereng teoritis, program FK manual, program FK minimum dan perhitungan manual kasus 2	IV-3
Tabel 4.3.	Hasil analisis stabilitas lereng teoritis, program FK manual, program FK minimum dan perhitungan manual kasus 3	IV-4
Tabel 4.4.	Hasil analisis stabilitas lereng teoritis, program FK manual, program FK minimum dan perhitungan manual kasus 4	IV-5
Tabel 4.5.	Hasil analisis stabilitas lereng perhitungan manual dan program FK minimum kasus 5	IV-6
Tabel 4.6.	Hasil analisis stabilitas lereng perhitungan manual dan program FK minimum kasus 6	IV-7
Tabel 4.7.	Perbandingan antara analisis stabilitas lereng teoritis, program FK manual, perhitungan manual dan program FK minimum	IV-8

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Permukaan tanah yang tidak selalu membentuk bidang datar atau mempunyai perbedaan elevasi antara tempat yang satu dengan yang lain sehingga membentuk suatu lereng (*slope*). Perbedaan elevasi tersebut pada kondisi tertentu dapat menimbulkan kelongsoran lereng sehingga dibutuhkan suatu analisis stabilitas lereng. Analisis stabilitas lereng mempunyai peran yang sangat penting pada perencanaan konstruksi-konstruksi sipil. Kondisi tanah asli yang tidak selalu sesuai dengan perencanaan yang diinginkan misalnya lereng yang terlalu curam sehingga dilakukan pemotongan bukit atau kondisi lain yang membutuhkan timbunan dan lain sebagainya. Sehingga diperlukan analisis stabilitas lereng yang lebih akurat agar diperoleh konstruksi lereng yang mantap (sesuai dengan syarat keamanan).

Untuk mendapatkan suatu nilai faktor keamanan minimum dari suatu analisis stabilitas lereng memerlukan suatu proses coba-coba (*trial and error*). Pada proses *trial and error* yang dilakukan secara manual akan membutuhkan waktu yang cukup lama dan diperlukan ketelitian. Proses analisis yang cukup lama dan kurang akurat inilah yang melatarbelakangi pembuatan sebuah program (*software*) analisis stabilitas lereng. Dengan program ini diharapkan dapat mempercepat proses analisis tersebut dan hasil perhitungan faktor keamanan yang didapatkan lebih akurat.

1.2. TUJUAN DAN MANFAAT

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk mempelajari analisis stabilitas lereng. Secara khusus penelitian ini bertujuan untuk :

- Mengembangkan metode analisis stabilitas lereng dengan pendekatan numerik.
- Untuk membuat program yang dapat membantu dalam menganalisis stabilitas lereng secara akurat.

Manfaat yang diharapkan adalah hasil perhitungan yang cepat, teliti, dan akurat dengan mengefisiensi waktu yang ada.

1.3. BATASAN MASALAH

Pada penelitian ini, asumsi-asumsi yang digunakan dalam pembuatan program stabilitas lereng adalah sebagai berikut :

- Penampang geoteknik yang dapat dihitung maksimal 10 layer (lapis) tanah dan horisontal.
- Kelongsoran lereng dianggap terjadi pada permukaan bidang tertentu dengan model dua dimensi.
- Masa tanah yang longsor dianggap masa masif.
- Bidang longsor yang ditinjau berbentuk rotasi atau lingkaran.
- Tidak meninjau aliran permukaan, pengaruh aliran tanah artesis maupun rembesan.
- Tidak meninjau akibat beban luar yang terjadi.
- Tidak meninjau adanya retakan permukaan (*crack*) yang terjadi.

1.4. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I. PENDAHULUAN

Meliputi latar belakang, tujuan, manfaat, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang dasar-dasar teori dan referensi Tugas Akhir tersebut.

BAB III. METODOLOGI

Metode analisis yang digunakan adalah menggunakan Metode Irisan (*Slices method*).

BAB IV. VALIDASI PROGRAM

Berisi tentang perbandingan hasil perhitungan manual yang telah ada dengan hasil perhitungan program komputer yang kami buat sebagai validasi program serta pembahasan terhadap hasil-hasil tersebut.

BAB V. PENUTUP

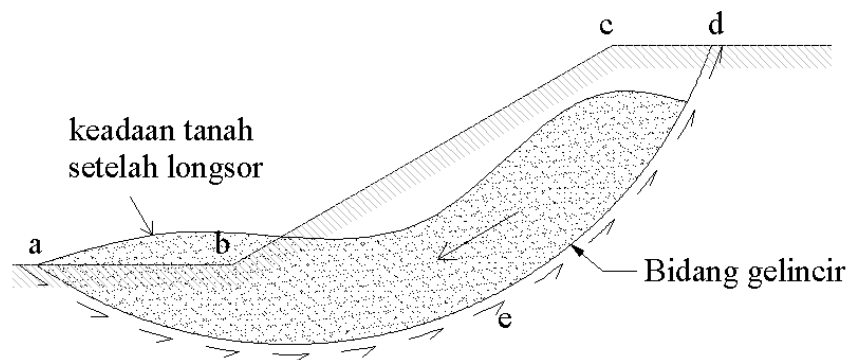
Berisi kesimpulan dari bab-bab sebelumnya serta saran-saran yang berguna bagi perkembangan dan keberhasilan dalam analisis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. STABILITAS LERENG

Suatu permukaan tanah yang miring yang membentuk sudut tertentu terhadap bidang horisontal disebut sebagai lereng (*slope*). Lereng dapat terjadi secara alamiah atau dibentuk oleh manusia dengan tujuan tertentu. Jika permukaan membentuk suatu kemiringan maka komponen massa tanah di atas bidang gelincir cenderung akan bergerak ke arah bawah akibat gravitasi. Jika komponen gaya berat yang terjadi cukup besar, dapat mengakibatkan longsor pada lereng tersebut. Kondisi ini dapat dicegah jika gaya dorong (*driving force*) tidak melampaui gaya perlawanan yang berasal dari kekuatan geser tanah sepanjang bidang longsor seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.1.

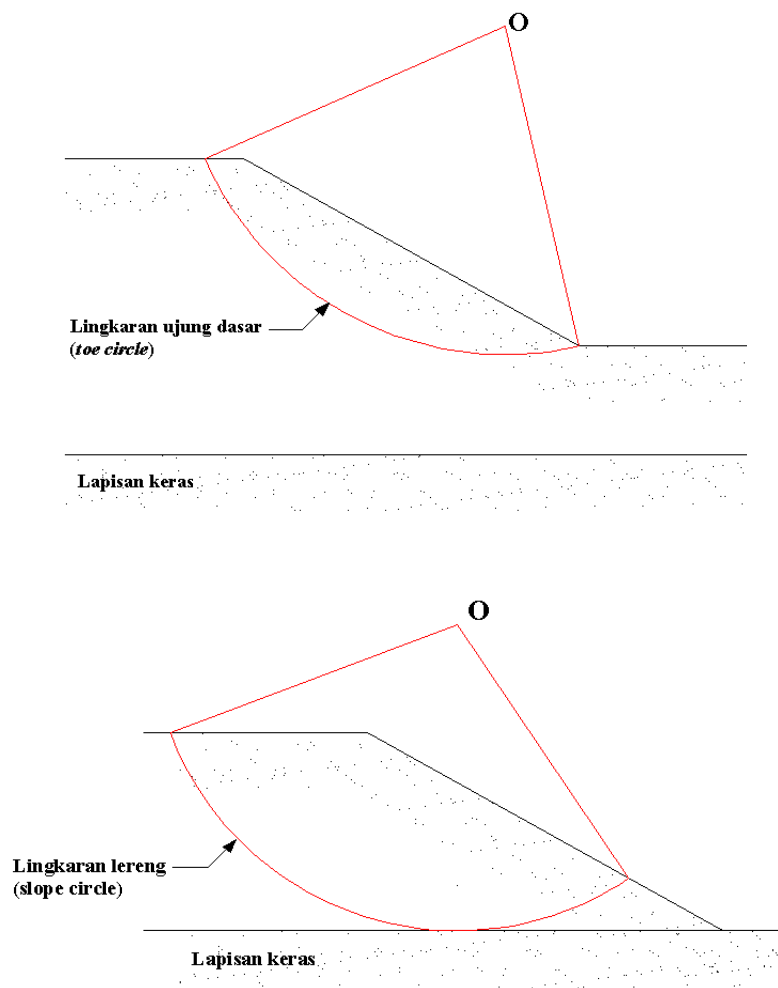


Gambar 2.1. Kelongsoran lereng

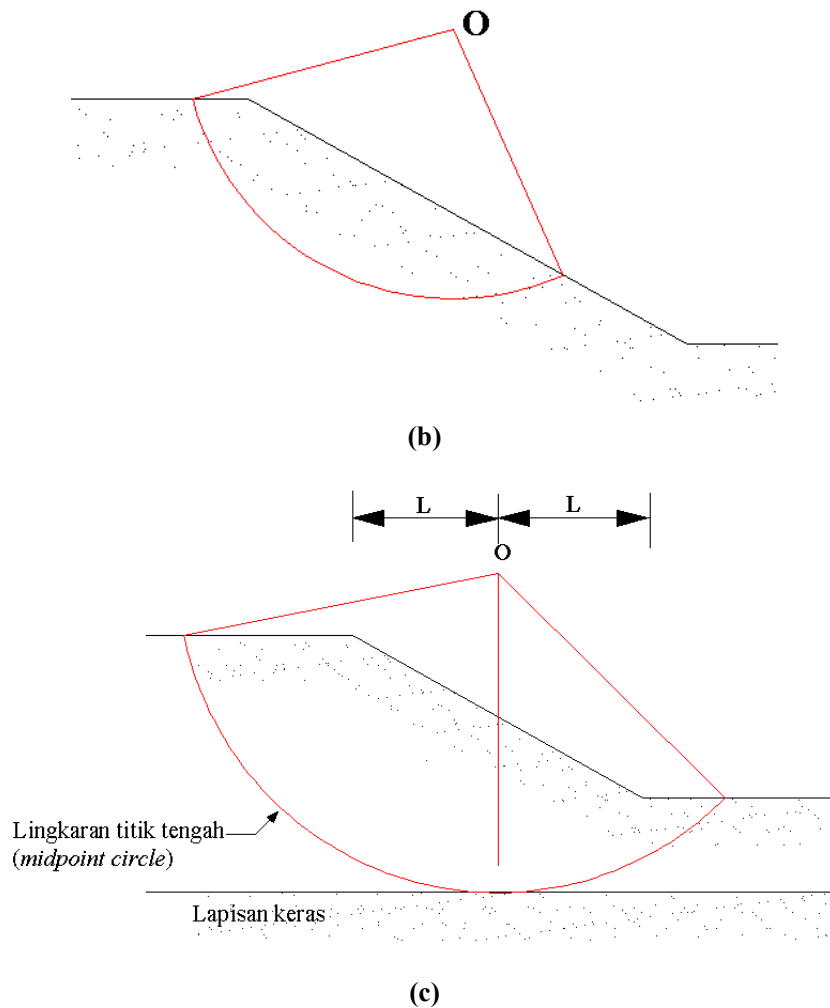
Bidang gelincir dapat terbentuk dimana saja di daerah-daerah yang lemah. Jika longsor terjadi dimana permukaan bidang gelincir memotong lereng pada dasar atau di atas ujung dasar dinamakan longsor lereng (*slope failure*) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.2a. Lengkung kelongsoran disebut sebagai lingkaran ujung dasar (*toe circle*), jika bidang gelincir tadi melalui ujung dasar maka disebut lingkaran lereng (*slope circle*). Pada kondisi tertentu terjadi kelongsoran dangkal (*shallow slope failure*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2b. Jika longsor terjadi dimana permukaan bidang gelincir berada agak

jauh di bawah ujung dasar dinamakan longsor dasar (*base failure*) seperti pada Gambar 2.2c. Lengkung kelongsorannya dinamakan lingkaran titik tengah (*midpoint circle*) (Braja M. Das, 2002).

Proses menghitung dan membandingkan tegangan geser yang terbentuk sepanjang permukaan longsor yang paling mungkin dengan kekuatan geser dari tanah yang bersangkutan dinamakan dengan Analisis Stabilitas Lereng (*Slope Stability Analysis*).



(a)



Gambar 2.2. Bentuk-bentuk keruntuhan lereng (a) Kelongsoran lereng, (b) Kelongsoran lereng dangkal, (c) Longsor dasar

2.1.1. Parameter Tanah/Batuan

Untuk analisis stabilitas lereng diperlukan parameter tanah/batuan :

- **Kuat geser**

Kuat geser terdiri dari kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Untuk analisis stabilitas lereng untuk jangka panjang digunakan harga kuat geser efektif maksimum (c' , ϕ'). Untuk lereng yang sudah mengalami gerakan atau material pembentuk lereng yang mempunyai diskontinuitas tinggi digunakan harga kuat geser sisa ($c^r = 0$; ϕ').

- **Berat Isi**

Berat isi diperlukan untuk perhitungan beban guna analisis stabilitas lereng. Berat isi dibedakan menjadi berat isi asli, berat isi jenuh, dan berat isi terendam air yang penggunaannya tergantung kondisi lapangan.

Salah satu penerapan pengetahuan mengenai kekuatan geser tanah/batuan adalah untuk analisis stabilitas lereng. Keruntuhan geser pada tanah atau batuan terjadi akibat gerak relatif antarbutirnya. Oleh sebab itu kekuatannya tergantung pada gaya yang bekerja antarbutirnya. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kekuatan geser terdiri atas :

- Bagian yang bersifat kohesif, tergantung pada macam tanah/batuan dan ikatan butirnya.
- Bagian yang bersifat gesekan, yang sebanding dengan tegangan efektif yang bekerja pada bidang geser.

Kekuatan geser tanah dapat dinyatakan dengan rumus :

$$S = C' + (\tau - \mu) \tan \phi \quad (2.1)$$

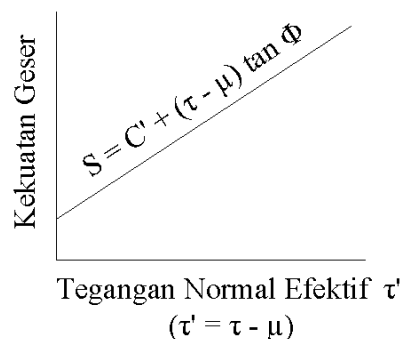
dimana : S = kekuatan geser

τ = tegangan total pada bidang geser

μ = tegangan air pori

C' = kohesi efektif

ϕ = sudut geser dalam efektif



Gambar 2.3. Kekuatan geser tanah/batuan

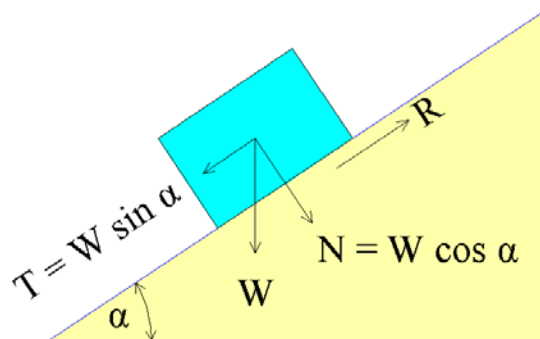
Analisis stabilitas lereng pada dasarnya dapat ditinjau sebagai mekanisme gerak suatu benda yang terletak pada bidang miring. Benda akan tetap pada

posisinya jika gaya penahan R yang terbentuk oleh gaya geser antara benda dan permukaan lereng lebih besar dibandingkan dengan gaya gelincir T dari benda akibat gaya gravitasi. Sebaliknya benda akan tergelincir jika gaya penahan R lebih kecil dibanding dengan gaya gelincir T . Secara skematik terlihat pada Gambar (2.4). Secara matematis stabilitas lereng dapat diformulasikan sebagai :

$$FK = \frac{R}{T} \quad (2.2)$$

dimana FK = faktor keamanan
 R = gaya penahan
 T = gaya yang menyebabkan gelincir

Jika $FK < 1$ benda akan bergerak
 $FK = 1$ benda dalam keadaan seimbang
 $FK > 1$ benda akan diam



Gambar 2.4. Keseimbangan benda pada bidang miring

2.1.2. Angka Keamanan (*Safety Factor*)

Mengingat lereng terbentuk oleh banyaknya variabel dan banyaknya faktor ketidakpastian antara lain parameter-parameter tanah seperti kuat geser tanah, kondisi tekanan air pori maka dalam menganalisis selalu dilakukan penyederhanaan dengan berbagai asumsi. Secara teoritis massa yang bergerak dapat dihentikan dengan meningkatkan kekuatan gesernya.

Hal yang perlu dipertimbangkan dalam penentuan kriteria faktor keamanan adalah resiko yang dihadapi, kondisi beban dan parameter yang

digunakan dalam melakukan analisis stabilitas lereng. Resiko yang dihadapi dibagi menjadi tiga yaitu : tinggi, menengah dan rendah. Tugas seorang *engineer* meneliti stabilitas lereng untuk menentukan faktor keamanannya. Secara umum, faktor keamanan dapat dijelaskan sebagai berikut :

$$FK = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (2.3)$$

dimana FK = angka keamanan terhadap kekuatan tanah.

τ_f = kekuatan geser rata-rata dari tanah.

τ_d = Tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor.

Kekuatan geser suatu lahan terdiri dari dua komponen, friksi dan kohesi, dan dapat ditulis,

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.4)$$

dimana, c = kohesi tanah penahan

ϕ = sudut geser penahan

σ = tegangan normal rata-rata pada permukaan bidang longsor.

Atau dapat ditulis,

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d \quad (2.5)$$

Dimana c_d adalah kohesi dan ϕ_d sudut geser yang bekerja sepanjang bidang longsor. Dengan mensubstitusi persamaan (2.4) dan persamaan (2.5) ke dalam persamaan (2.3) sehingga kita mendapat persamaan yang baru,

$$FK = \frac{c + \sigma \tan \phi}{c_d + \sigma \tan \phi_d} \quad (2.6)$$

Sekarang kita dapat mengetahui beberapa parameter lain yang mempengaruhi angka keamanan tadi, yaitu angka keamanan terhadap kohesi, F_c , dan angka keamanan terhadap sudut geser F_ϕ . Dengan demikian F_c dan F_ϕ dapat kita definisikan sebagai :

$$F_c = \frac{c}{c_d} \quad (2.7)$$

dan

$$F_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \quad (2.8)$$

Bilamana persamaan (2.6), (2.7), dan (2.8) dibandingkan adalah wajar bila F_c menjadi sama dengan F_ϕ , harga tersebut memberikan angka keamanan terhadap kekuatan tanah. Atau, jika

$$\frac{c}{c_d} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d}$$

Kita dapat menuliskan

$$FK = F_c = F_\phi \quad (2.9)$$

FK sama dengan 1 maka lereng dalam keadaan akan longsor. Biasanya, 1.5 untuk angka keamanan terhadap kekuatan geser yang dapat diterima untuk merencanakan suatu stabilitas lereng (SKBI-2.3.06, 1987).

Parameter yang digunakan menyangkut hasil pengujian dengan harga batas atau sisa dengan mempertimbangkan ketelitiannya. Tabel 2.1 memperlihatkan faktor keamanan terendah berdasar hal-hal tersebut di atas.

Tabel 2.1.
Faktor Keamanan Minimum Stabilitas Lereng

Risiko	Kondisi Beban	Parameter Kekuatan Geser			
		Maksimum		Sisa	
		Teliti	Kurang Teliti	Teliti	Kurang Teliti
Tinggi	Dengan Gempa	1,50	1,75	1,35	1,50
	Tanpa Gempa	1,80	2,00	1,60	1,80
Menengah	Dengan Gempa	1,30	1,60	1,20	1,40
	Tanpa Gempa	1,50	1,80	1,35	1,50
Rendah	Dengan Gempa	1,10	1,25	1,00	1,10
	Tanpa Gempa	1,25	1,40	1,10	1,20

Resiko tinggi jika ada konsekuensi terhadap manusia cukup besar (ada pemukiman), dan atau bangunan sangat mahal, dan atau sangat penting. Resiko menengah bila ada konsekuensi terhadap manusia tetapi sedikit (bukan pemukiman), dan atau bangunan tidak begitu mahal dan atau tidak begitu penting. Resiko rendah bila tidak ada konsekuensi terhadap manusia dan terhadap bangunan (sangat murah) (SKBI-2.3.06, 1987).

Kekuatan geser maksimum adalah harga puncak dan dipakai apabila massa tanah/batuan yang potensial longsor *tidak* mempunyai bidang diskontinuitas (perlapisan, rekahan, sesar dan sebagainya) dan *belum* pernah mengalami gerakan. Kekuatan residual dipakai apabila : (i) massa tanah/batuan yang potensial bergerak mempunyai bidang diskontinuitas, dan atau (ii) pernah bergerak (walaupun tidak mempunyai bidang diskontinuitas) (SKBI-2.3.06, 1987).

2.1.3. Analisis Stabilitas Lereng

Pada umumnya analisis stabilitas lereng dapat dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu :

- **Prosedur Massa (*Mass Procedure*)**

Pada cara analisis ini massa tanah yang berada di atas bidang gelincir diambil sebagai satu kesatuan. Prosedur ini berguna bila tanah yang membentuk lereng dianggap homogeny (Braja M. Das, 2002).

- **Metoda Irisan (*Method of Slice*)**

Pada cara analisis ini tanah yang ada di atas bidang gelincir dibagi menjadi beberapa irisan-irisan parallel tegak. Stabilitas dari tiap-tiap irisan dihitung secara terpisah. Metode ini lebih teliti karena tanah yang tidak homogen dapat juga dimasukkan dalam perhitungan (Braja M. Das, 2002).

2.1.3.1. Prosedur Massa (*Mass Procedure*)

2.1.3.1.1. Stabilitas Lereng pada Tanah Lempung Homogen dengan $\phi = 0$

Pada cara analisis ini kekuatan geser dalam keadaan air pori dijaga tidak mengalir keluar (*undrained*) dari tanah dianggap tetap yaitu $\tau_f = c_u$. Untuk membuat analisis stabilitas dapat memilih suatu bidang gelincir percobaan AED yang merupakan busur lingkaran berjari-jari = r . Pusat lingkaran terletak pada O.

Dengan memperhatikan satu satuan tebal yang tegak lurus pada bagian yang ditinjau, maka berat tanah yang berada di atas lengkung (kurva) AED dapat diketahui melalui $W = W_1 + W_2$, dengan (Braja M. Das, 2002) :

$$W_1 = (\text{luas} \text{ FCDEF}) \times (\gamma)$$

atau

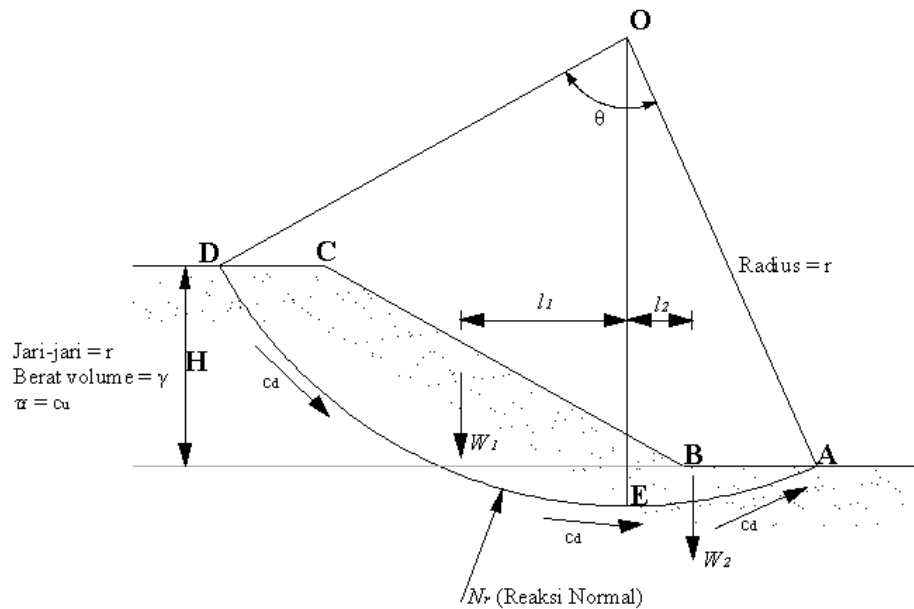
$$W_2 = (\text{luas} \text{ ABFEA}) \times (\gamma)$$

Momen gaya terhadap titik O yang menyebabkan ketidakstabilan lereng adalah :

$$M_d = W_1 l_1 - W_2 l_2 \quad (2.10)$$

dengan

l_1 dan l_2 adalah lengan momen.



Gambar 2.5. Analisis stabilitas lereng pada tanah lempung yang homogen $\phi = 0$

Perlawanan terhadap kelongsoran berasal dari kohesi yang bekerja sepanjang bidang gelincir. Momen gaya perlawanan terhadap titik O adalah :

$$M_R = c_d (\text{busur AED})(l)(r) = c_d r^2 \theta \quad (2.11)$$

Untuk keseimbangan, $M_R = M_d$ jadi,

$$c_d r^2 \theta = W_1 l_1 - W_2 l_2$$

atau

$$c_d = \frac{W_1 l_1 - W_2 l_2}{r^2 \theta} \quad (2.12)$$

Angka keamanan terhadap kelongsoran didapatkan sebagai :

$$F_s = \frac{\tau_f}{c_d} = \frac{c_u}{c_d} \quad (2.13)$$

Potensi bidang gelincir AED dipilih secara acak. Bidang longsor kritis terjadi jika bidang longsor yang mempunyai rasio c_u terhadap c_d adalah minimum atau harga c_d maksimum. Untuk mendapatkan bidang gelincir yang kritis dapat dibuat sejumlah percobaan dengan bidang gelincir yang berbeda-beda.

Untuk kasus lingkaran kritis besar kohesi yang dibutuhkan dapat dinyatakan dengan hubungan sebagai berikut :

$$c_d = \gamma H m$$

atau

$$\frac{c_d}{\gamma H} = m \quad (2.14)$$

Besaran m adalah bilangan tak berdimensi dan disebut sebagai angka stabilitas (*Stability Number*). Selanjutnya tinggi kritis lereng dapat dievaluasi dengan menggantikan $H = H_{cr}$ dan $c_d = c_d$ pada persamaan di atas. Jadi,

$$H_{cr} = \frac{c_u}{\gamma \times m} \quad (2.15)$$

Harga angka stabilitas m untuk lereng dengan bermacam-macam sudut kemiringan β dapat dilihat pada tabel terlampir (Lampiran Gambar 1). Terzaghi menggunakan istilah $\frac{\gamma H}{c_d}$, kebalikan dari m dan disebut sebagai faktor stabilitas

(*Stability Factor*). Pada tabel yang terlampir (Lampiran Gambar 1) hanya berlaku untuk lereng dari tanah lempung jenuh dan hanya berlaku untuk keadaan *undrained* pada saat $\varphi = 0$. Hal-hal yang harus diperhatikan jika mengacu pada tabel hubungan antara β dan m adalah sebagai berikut :

1. Untuk sudut kemiringan $\beta > 53^\circ$ lingkaran kritis selalu berupa lingkaran ujung dasar lereng. Letak pusat lingkaran ujung dasar lereng kritis mungkin dapat dicari dengan gambar yang terlampir (Lampiran Gambar 2).

- Untuk $\beta < 53^\circ$, lingkaran kritis mungkin berupa lingkaran ujung lereng, lingkaran lereng, atau lingkaran titik tengah tergantung letak lapisan tanah keras yang berada di bawah lereng. Hal ini disebut sebagai fungsi kedalaman (*Dept Function*) yang dijelaskan sebagai berikut :

$$D = \frac{\text{Jarak Vertikal Dari Puncak Lereng Ke Lapisan Keras}}{\text{Tinggi Lereng}}$$

- Jika lengkung kritis adalah lingkaran titik tengah yaitu permukaan bidang longsor merupakan bidang singgung dari lapisan keras maka letak titik pusat longsor dapat ditentukan dengan bantuan gambar (Lampiran Gambar 3).
- Harga maksimum angka stabilitas (*Stability Number*) yang mungkin terjadi pada kelongsoran lingkaran titik tengah adalah 0,181 (Braja M. Das, 2002).

2.1.3.1.2. Stabilitas Lereng pada Tanah Homogen c' - ϕ'

Kekuatan geser untuk tanah yang homogen diberikan dengan persamaan :

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

Tekanan air pori dianggap sama dengan nol. Busur AC adalah lengkung lingkaran percobaan melalui ujung dasar lereng, dan O adalah pusat lingkaran. Dengan meninjau satu satuan tebal tegak lurus pada lereng, maka (Braja M. Das, 2002) :

$$\text{Berat blok tanah ABC} = W = (\text{luasan ABC})(\gamma)$$

Untuk keseimbangan maka gaya lain yang bekerja pada blok adalah sebagai berikut :

- C_d - resultan gaya kohesi yang besarnya sama dengan satuan kohesi yang diperlukan dikalikan dengan panjang tali busur AC. Besaran C_d yang diperoleh dari Gambar 2.4 adalah :

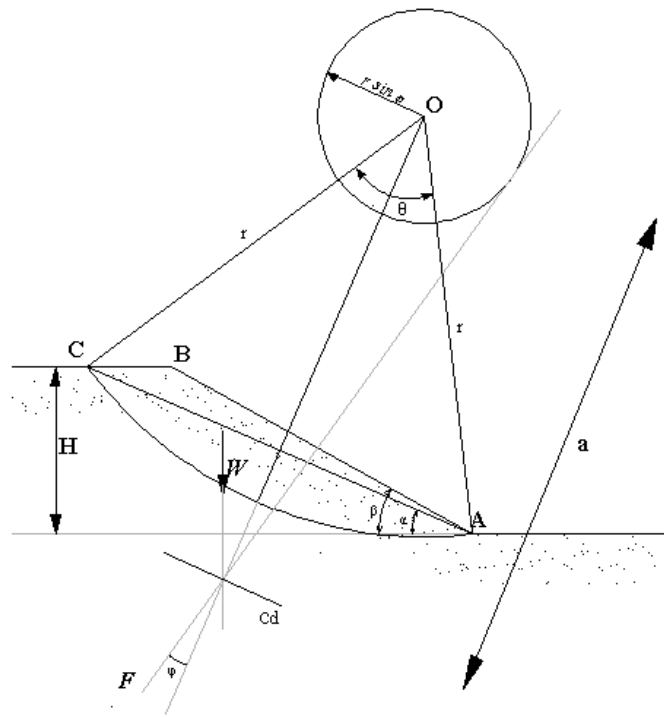
$$C_d(a) = c_d(\text{busur AC})$$

C_d bekerja dalam arah sejajar dengan tali busur AC dan pada jarak a dari pusat lingkaran O sehingga :

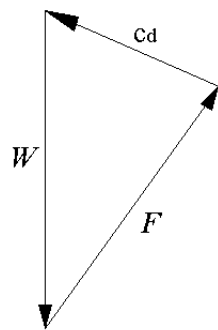
$$C_d(a) = c_d(\text{busur AC})r$$

Atau

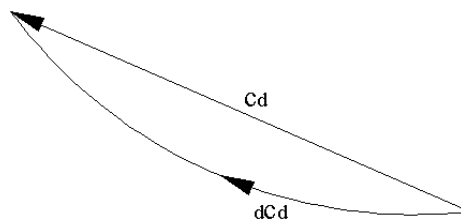
$$a = \frac{c_d \times (\text{busur AC}) \times r}{C_d} = \frac{(\text{busur AC})}{(\text{tali busur AC})} \times r \quad (2.16)$$



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.6. (a) Analisis stabilitas lereng pada tanah homogeny $\phi' - c'$, (b) Besaran C_d , (c) Poligon gaya antara W, F dan C_d

- F – resultan gaya normal dan gaya geser yang bekerja sepanjang permukaan bidang longsor. Untuk keseimbangan garis kerja gaya F akan melalui titik perpotongan garis kerja W dan C_d .

Jika menganggap bahwa geseran seluruhnya termobilisir yaitu $\varphi_d = \varphi$ atau $F_\varphi = I$ maka garis kerja dari F akan membentuk sudut φ dengan suatu garis normal terhadap lengkungan dan gaya F tadi akan menyinggung lingkaran yang berpusat di O dan berjari-jari $r \cdot \sin\varphi$. Lingkaran inilah yang dinamakan lingkaran geser dengan jari-jari sedikit lebih besar daripada $r \cdot \sin\varphi$ (Braja M. Das, 2002).

Karena arah W , C_d dan F diketahui maka polygon gayanya dapat dibuat. Besaran C_d dapat ditentukan dari polygon gaya. Sehingga satuan kohesi yang diperlukan dapat dicari dengan (Braja M. Das, 2002) :

$$c_d = \frac{C_d}{(\text{talibusur}AC)}$$

Penentuan besarnya harga c_d yang dijelaskan di atas didasarkan pada bidang longsor percobaan. Beberapa percobaan harus dibuat untuk mendapatkan bidang longsor yang paling kritis untuk kohesi yang dibutuhkan adalah maksimum. Oleh karena itu kohesi maksimum yang terbentuk sepanjang bidang longsor yang kritis dapat dituliskan sebagai (Braja M. Das, 2002) :

$$c_d = \gamma H [f(\alpha, \beta, \theta, \phi)] \quad (2.17)$$

Untuk keseimbangan kritis yaitu untuk $F_c = F_\varphi = FK = 1$ dapat menggantikan $H = H_{cr}$ dan $c_d = c$ pada persamaan 2.17.

$$c = \gamma H_{cr} [f(\alpha, \beta, \theta, \phi)]$$

atau

$$\frac{c}{\gamma H_{cr}} = f(\alpha, \beta, \theta, \phi) = m$$

dengan

$$m = \text{angka stabilitas}$$

Harga m untuk bermacam-macam harga φ dan β diberikan pada Lampiran Gambar 4. Dari hasil perhitungan terlihat bahwa untuk $\varphi > 3^\circ$ semua lingkaran-lingkaran kritis adalah lingkaran ujung dasar (*Toe Circle*) (Braja M. Das, 2002).

2.1.3.2. Metode Irisan (*Method of Slice*)

Analisis stabilitas dengan menggunakan metode irisan dapat dijelaskan dengan Gambar (2.7), dimana busur AC adalah sebuah lengkungan dari lingkaran yang menunjukkan permukaan bidang longsor. Tanah yang berada di atas bidang

longsor dibagi menjadi beberapa irisan tegak. Lebar dari setiap irisan tidak harus sama. Dengan meninjau satu satuan tebal tegak lurus irisan melintang lereng seperti Gambar (2.7), gaya-gaya yang bekerja pada irisan tertentu (irisan no. n) ditunjukkan pada Gambar (2.8). W_n adalah berat irisan. Gaya-gaya N_r dan T_r adalah komponen tegak dan sejajar dari reaksi R . P_n dan P_{n+1} adalah gaya normal yang bekerja pada sisi-sisi irisan. Demikian pula, gaya geser yang bekerja pada sisi irisan adalah T_n dan T_{n+1} . Secara sederhana, tegangan air pori diasumsikan nol. Gaya P_n , P_{n+1} , T_n dan T_{n+1} sulit untuk ditentukan. Akan tetapi kita dapat membuat suatu asumsi pendekatan bahwa besarnya resultan dari P_n dan T_n adalah sama besar dengan resultan dari P_{n+1} dan T_{n+1} dan juga garis-garis kerjanya segaris (Braja M. Das, 2002).

Untuk pengamatan kesetimbangan

$$N_r = W_n \cos \alpha_n \quad (2.18)$$

Gaya geser perlawanan dapat ditunjukkan dengan

$$Tr = \tau_d(\Delta L_n) = \frac{\tau_f(\Delta L_n)}{F_s} = \frac{1}{F_s} [c + \sigma \tan \phi] \Delta L_n \quad (2.19)$$

Tegangan normal, σ pada persamaan 14.9 sama dengan

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \quad (2.20)$$

Untuk keseimbangan blok percobaan ABC, momen gaya dorong terhadap titik O adalah sama dengan momen gaya perlawanan terhadap titik O, atau

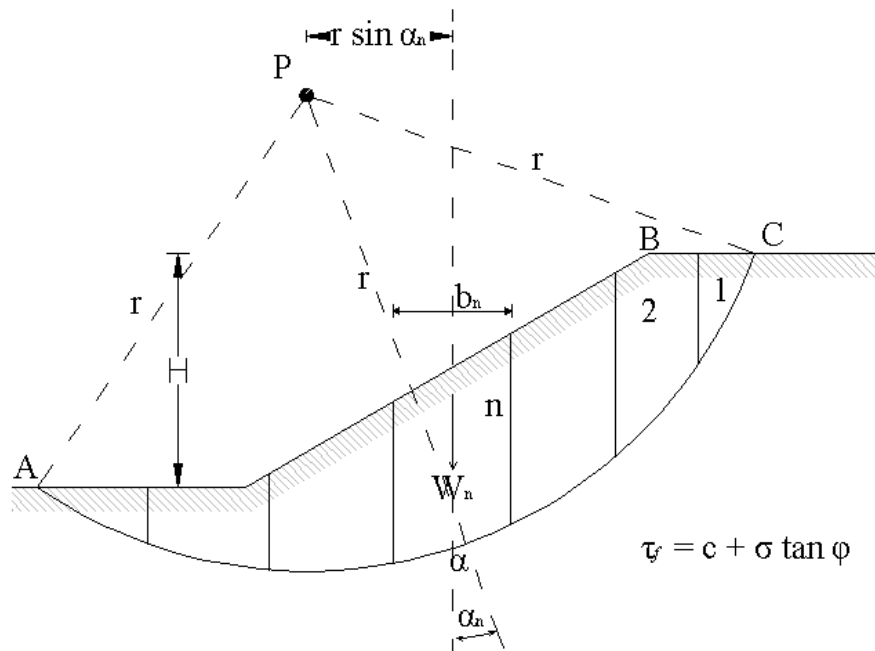
$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{F_s} \left(c + \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \tan \phi \right) (\Delta L_n) (r)$$

atau

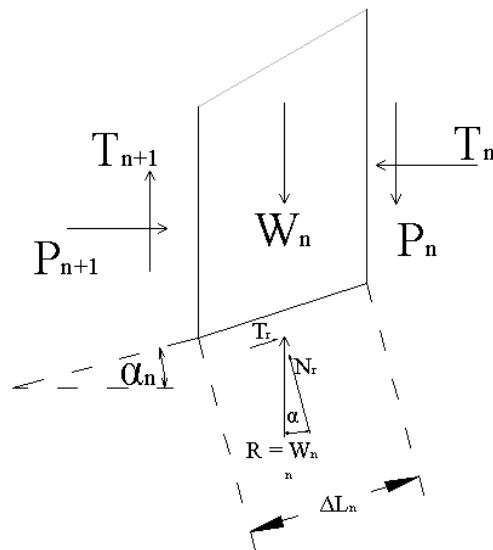
$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \cdot \tan \phi)}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (2.21)$$

Catatan : ΔL_n dalam Persamaan (2.21) diperkirakan sama dengan $\frac{(b_n)}{\cos \alpha_n}$

dengan b_n = lebar potongan nomor n.



Gambar 2.7. Permukaan bidang yang dicoba

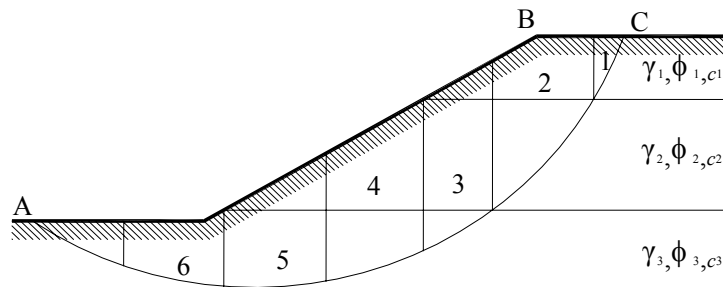


Gambar 2.8. Gaya yang bekerja pada irisan nomor n

Harga α_n adalah positif jika lereng bidang longsor yang merupakan sisi bawah dari irisan, berada pada kwadran yang sama dengan lereng muka tanah yang merupakan sisi atas dari irisan. Untuk mendapatkan angka keamanan yang minimum yaitu angka keamanan untuk lingkaran kritis, beberapa percobaan dibuat dengan cara mengubah letak pusat lingkaran yang dicoba. Metode ini

umumnya dikenal sebagai Metode Irisan Sederhana (*Ordinary Method of Slice*) (Braja M. Das, 2002).

Untuk mudahnya, suatu lereng dalam tanah yang homogen ditunjukkan pada Gambar (2.7) dan (2.8). Akan tetapi metode irisan dapat dikembangkan untuk lereng yang berlapis-lapis seperti pada Gambar (2.9). Prosedur umum dari analisis stabilitas tanah adalah sama. Tetapi ada beberapa hal yang perlu diingat. Selama menggunakan persamaan (2.21) untuk menghitung angka keamanan, harga-harga ϕ dan c tidak akan sama untuk semua potongan. Sebagai contoh, untuk potongan no. 3 (Gambar 2.9) kita harus menggunakan sudut geser $\phi = \phi_3$ dan kohesi $c = c_3$; serupa untuk potongan no. 2, $\phi = \phi_2$ dan $c = c_2$ (Braja M. Das, 2002).



Gambar 2.9. Analisis stabilitas dengan metode irisan untuk tanah yang berlapis

2.1.3.2.1. Fellenius

Cara ini dapat dipakai pada lereng-lereng dengan kondisi isotropis, non isotropis dan berlapis-lapis. Massa tanah yang bergerak diandaikan terdiri atas beberapa elemen vertikal. Lebar elemen dapat diambil tidak sama dan sedemikian sehingga lengkung busur di dasar elemen dapat dianggap garis lurus (SKBI-2.3.06, 1987).

Berat "total" tanah/batuan pada suatu elemen (W_i) termasuk beban luar yang bekerja pada permukaan lereng (Gambar 2.10 dan 2.11). W_i diuraikan dalam komponen tegak lurus dan tangensial pada dasar elemen. Dengan cara ini pengaruh gaya T dan E yang bekerja di samping elemen diabaikan. Faktor

keamanan adalah perbandingan momen penahan longsor dengan penyebab longsor. Pada Gambar 2.10 momen tahanan geser pada bidang longsor adalah (SKBI-2.3.06, 1987) :

$$M_{penahan} = R \cdot r \quad (2.13)$$

dimana R adalah gaya geser dan r adalah jari-jari bidang longsor. Tahanan geser pada dasar tiap elemen adalah :

$$R = S \cdot l = l (c' + \sigma \tan \phi'); \sigma = \frac{W_t \cos \alpha}{l} \quad (2.14)$$

Momen penahan yang ada sebesar :

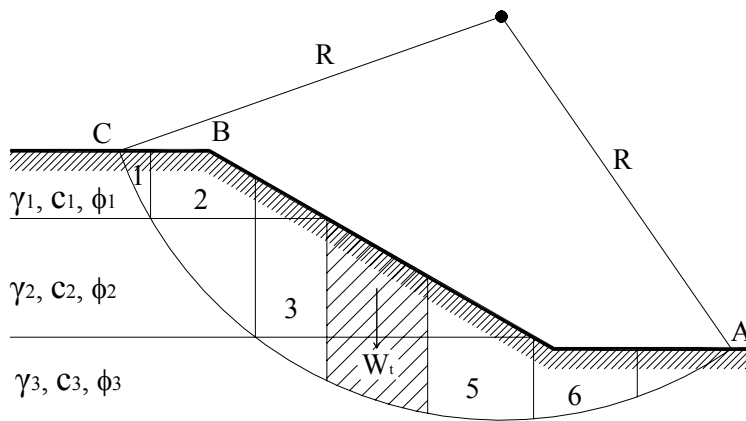
$$M_{penahan} = r (c' l + W_t \cos \sigma \tan \phi') \quad (2.15)$$

Komponen tangensial W_t bekerja sebagai penyebab longsor menimbulkan momen penyebab :

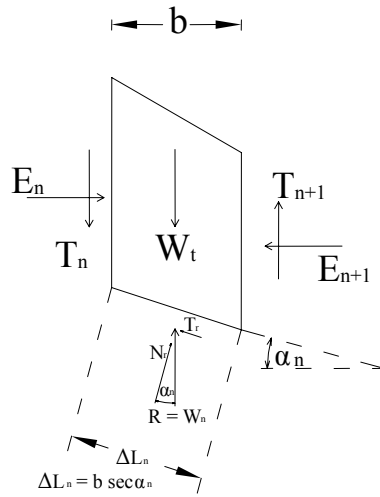
$$M_{penyebab} = (W_t \sin \alpha) \cdot r \quad (2.16)$$

Faktor keamanan dari lereng menjadi :

$$FK = \frac{\sum (c' l + W_t \cos \alpha \tan \phi')}{\sum W_t \sin \alpha} \quad (2.17)$$



Gambar 2.10. Sistem gaya pada cara Fellenius



$$S = c' \cdot \Delta L_n + \Delta L_n \cdot \sigma \tan \phi$$

Gambar 2.11. Gaya-gaya yang bekerja pada potongan tunggal

2.1.3.2.2. Bishop

Cara analisis yang dibuat oleh A.W. Bishop (1955) menggunakan cara elemen dimana gaya yang bekerja pada tiap elemen ditunjukkan seperti pada Gambar 2.12. Persyaratan keseimbangan yang diterapkan pada elemen yang membentuk lereng tersebut. Faktor keamanan terhadap keruntuhan didefinisikan sebagai perbandingan kekuatan geser maksimum yang dimiliki tanah di bidang longsoran ($S_{tersedia}$) dengan tahanan geser yang diperlukan untuk keseimbangan (S_{perlu}) (SKBI-2.3.06, 1987).

$$FK = \frac{S_{tersedia}}{S_{perlu}}$$

Bila kekuatan geser tanah adalah :

$$S_{tersedia} = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' = c' + \sigma' \tan \phi'$$

maka tahanan geser yang diperlukan untuk keseimbangan adalah :

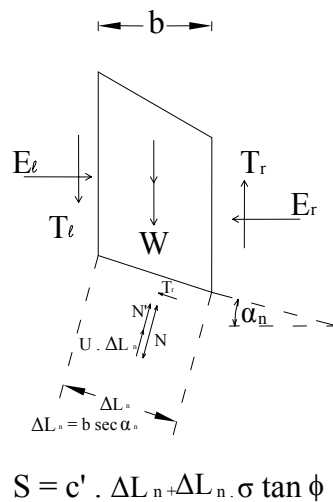
$$S_{perlu} = \frac{1}{FK} (c' + (\sigma - \mu) \tan \phi') \quad (2.18)$$

Faktor keamanan dihitung berdasar rumus :

$$FK = \frac{\sum \frac{1}{m} (c'l + (W - \mu l) \tan \phi')}{W \sin \alpha} \quad (2.19)$$

Cara penyelesaian merupakan coba ulang (*trial dan error*) harga faktor keamanan FK di ruas kiri persamaan (2.19), dengan menggunakan Gambar 2.12 untuk mempercepat perhitungan (SKBI-2.3.06, 1987).

Faktor keamanan menurut cara ini menjadi tidak sesuai dengan kenyataan, terlalu besar, bila sudut negatif (-) di lereng paling bawah mendekati 30° (Gambar 2.12). Kondisi ini bisa timbul bila lingkaran longsor sangat dalam atau pusat rotasi yang diandaikan berada dekat puncak lereng. Faktor keamanan yang diperoleh dengan cara ini lebih besar daripada dengan cara Fellenius (SKBI-2.3.06, 1987).



Gambar 2.12. Suatu gaya pada suatu elemen menurut Bishop

2.1.3.2.3. Janbu

Janbu (1954) mengembangkan suatu cara analisis stabilitas lereng yang dapat diterapkan untuk semua bidang longsor. Besaran-besaran yang akan dicari adalah : F (yang berhubungan dengan T , N , E dan S). Berdasarkan keseimbangan gaya vertikal (SKBI-2.3.06, 1987) :

$$N \cos \theta = W + \Delta S - T \sin \theta$$

$$N = (W + \Delta S) \sec \theta - T \tan \theta$$

Jumlah gaya-gaya tegak lurus maupun tangensial terhadap bidang dasar irisan adalah nol. Sehingga persamaannya adalah (SKBI-2.3.06, 1987) :

$$S = y \frac{dE}{dx} - \frac{d}{dx}(Ey_i) \quad (2.20)$$

$$\Delta N = (\Delta W - \Delta S) \cos \theta + \Delta E \sin \theta \quad (2.21)$$

$$\Delta T = (\Delta W + \Delta S) \sin \theta - \Delta E \cos \theta \quad (2.22)$$

Kriteria longsor Mohr-Coulomb adalah :

$$\Delta T = \frac{c \Delta x \sec \theta + \Delta N (\tan \theta)}{F} \quad (2.23)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.20), (2.21), (2.22) dan memisalkan $x = 0$,

$$\frac{dE}{dx} \left(1 + \frac{\tan \phi}{F} \frac{dy}{dx} \right) + \frac{dS}{dx} \left(\frac{\tan \phi}{F} - \frac{dy}{dx} \right) = -\frac{c}{F} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] + \frac{dW}{dx} \left(\frac{\tan \phi}{F} + \frac{dy}{dx} \right) \quad (2.24)$$

Persamaan (2.21) dan (2.25) merupakan dua persamaan diferensial, yang digunakan untuk menentukan E , S , y_i . Untuk melengkapi sistem persamaan tersebut, dimisalkan :

$$S = \lambda f(x) E$$

Dimana $f(x)$ adalah suatu fungsi dari x , dan $\lambda =$ konstanta.

λ dan F dapat dipecahkan dengan persamaan (2.20) dan (2.24).

$F(x)$ dimisalkan linier dengan menentukan suatu angka tertentu dapat ditentukan harga λ yang memenuhi persamaan-persamaan tersebut (SKBI-2.3.06, 1987).

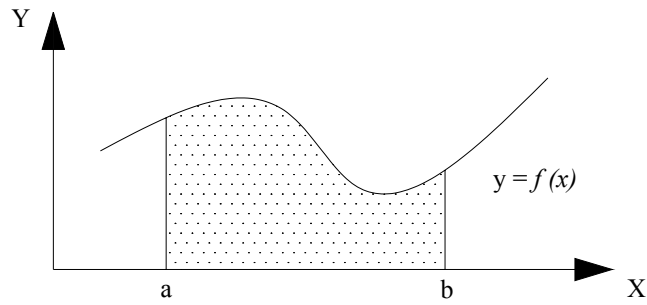
2.2. ANALISIS NUMERIK

2.2.1. Integrasi Numerik

Penyelesaian masalah di dalam dunia sains dan teknik sering berhubungan dengan penyelesaian fungsi diferensial dan integral sebagai bagian yang tidak terpisahkan dari penyelesaian model matematik. Jika penyelesaian secara matematik sulit dilakukan, maka teknik pendekatan numerik bisa menjadi pilihan. Bahkan beberapa penyelesaian persamaan diferensial hanya dapat diselesaikan dengan cara tersebut, karena kompleks dan besar.

$$A = \int_a^b f(x) dx \quad (2.25)$$

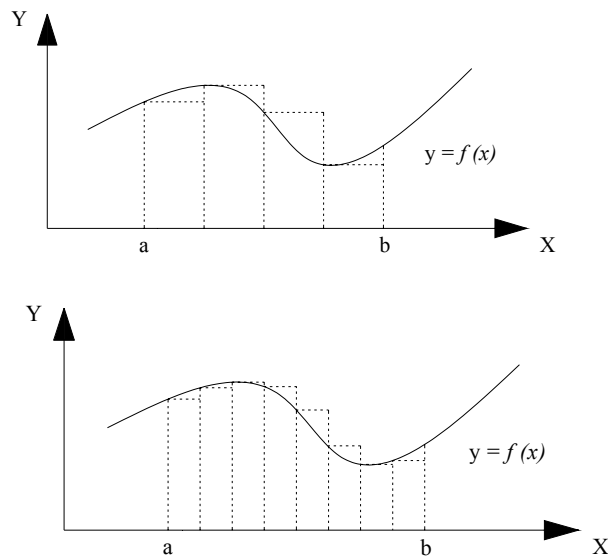
Penyelesaian eksak integral fungsi diatas sama dengan menghitung luasan dibawah kurva $y = f(x)$ antara titik $x = a$ dan titik $x = b$.



Gambar 2.13. Penyelesaian eksak – integral

Integrasi numerik untuk menghitung luasan dibawah kurva menggunakan konsep pendekatan, luasan akan dibagi menjadi pias – pias kecil sedemikian sehingga piasan tersebut kalau dirangkai mendekati bentuk eksak. Pada umumnya pendekatan mempunyai ciri – ciri semakin sederhana dan semakin sedikit proses yang dilakukan, maka hasilnya relatif kurang teliti dibanding metode yang lebih kompleks dan prosesnya banyak.

2.2.1.1. Pendekatan Cara Persegi

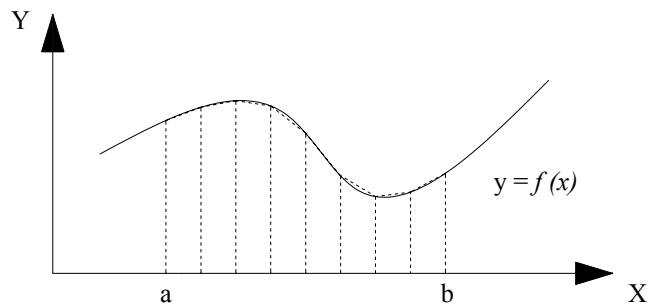
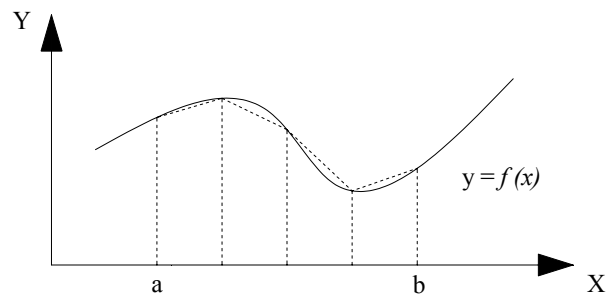


Gambar 2.14. Pendekatan cara persegi

Dari gambar pendekatan terlihat bahwa dengan pembagian jumlah pias yang kecil sehingga luasan yang dihasilkan tentu tidak seteliti jika dibagi dengan jumlah pias yang lebih banyak.

2.2.1.2. Pendekatan Cara Trapezoidal

Penyelesaian dengan cara trapezoidal adalah mencari rata – rata tinggi kurva potongan awal dan potongan akhir sehingga selisih luasan dibawah kurva akan lebih teliti dibandingkan pendekatan dengan cara persegi.



Gambar 2.15. Pendekatan cara trapezoidal

Dari ilustrasi diatas, terlihat bahwa pias-pias yang ada sebaiknya terdiri atas interval yang seragam (tertentu), sedangkan tinggi berbeda tergantung pada fungsi $y = f(x)$. Jika ada n interval dengan jarak yang seragam, maka panjangnya adalah :

$$h = \frac{(b-a)}{n} \tag{2.26}$$

Kemudian menghitung setiap titik interval tersebut sebagai berikut :

$$x_0 = a, x_1 = (a + h), x_2 = (a + 2h), \dots, x_n = b \quad (2.27)$$

Sehingga luas trapezoidal ke – i dapat dicari dari :

$$A_i = \frac{h}{2}(f(x_{i-1}) + f(x_i)) \quad (2.28)$$

Luas total area dibawah kurva antara titik $x = a$ sampai $x = b$ adalah :

$$A_{total} = \frac{h}{2}((f(x_0) + f(x_1)) + (f(x_1) + f(x_2)) + \dots + (f(x_{n-1}) + f(x_n)))$$

$$A_{total} = \frac{h}{2}(f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)) \quad (2.29)$$

Ekspresi di atas merupakan pendekatan cara trapezoidal.

2.2.2. Persamaan Taklinier

Masalah dalam penyelesaian persamaan taklinier sering muncul dan secara alamiah dalam masalah-masalah praktis. Bentuk umum dari permasalahan ini dapat dituliskan sebagai :

$$f(x) = 0 \quad (2.30)$$

dengan f adalah fungsi taklinier dari x . Nilai-nilai dari x disebut dengan penyelesaian atau akar dari persamaan. Metode-metode penyelesaian yang digunakan adalah metode bagi dua.

2.2.2.1. Metode Bagidua (*Bisection*)

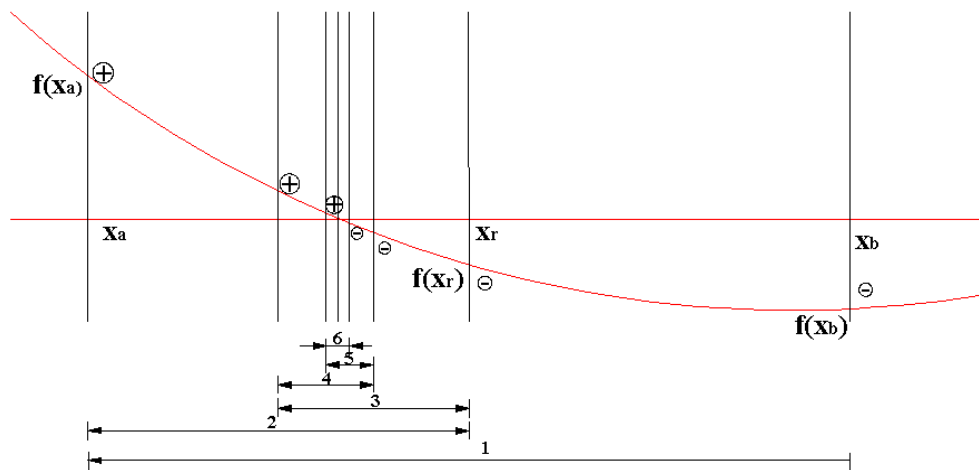
Metode bagidua juga disebut metode pemenggalan biner, pamaruhan selang atau juga metode Bolzano merupakan salah satu jenis metode pencarian incremental secara bertambah dengan selang selalu dibagidua. Jika suatu fungsi berubah tanda pada suatu selang maka nilai fungsi dihitung pada titik tengah, kemudian lokasi akar ditentukan sebagai terletak pada titik tengah selang bagian tempat terjadinya perubahan tanda. Prosesnya kemudian diulang untuk memperoleh taksiran yang diperhalus. Algoritma untuk metode bagidua ini diperlihatkan pada Gambar 2.16.

Langkah 1 : Memilih batas taksiran x_a atas dan x_b bawah untuk akar sehingga perubahan fungsi mencakup seluruh interval. Hal ini dapat diperiksa dengan memastikan $f(x_a)f(x_b) < 0$.

Langkah 2 : Taksiran akar x_r ditentukan oleh $x_r = \frac{x_a + x_b}{2}$

Langkah 3 : Melakukan langkah evaluasi berikut untuk memastikan pada bagian interval yang mana akan berada :

- Jika $f(x_b)f(x_r) < 0$, akar berada pada bagian interval antara x_r dan x_b , maka $x_a = x_r$ dan kembali ke langkah 2.
- Jika $f(x_b)f(x_r) > 0$, akar berada pada bagian interval antara x_a dan x_r , maka $x_b = x_r$ dan kembali ke langkah 2.
- Jika $f(x_b)f(x_r) \approx 0$, akar setara x_r atau x_b dan menghentikan komputasi.

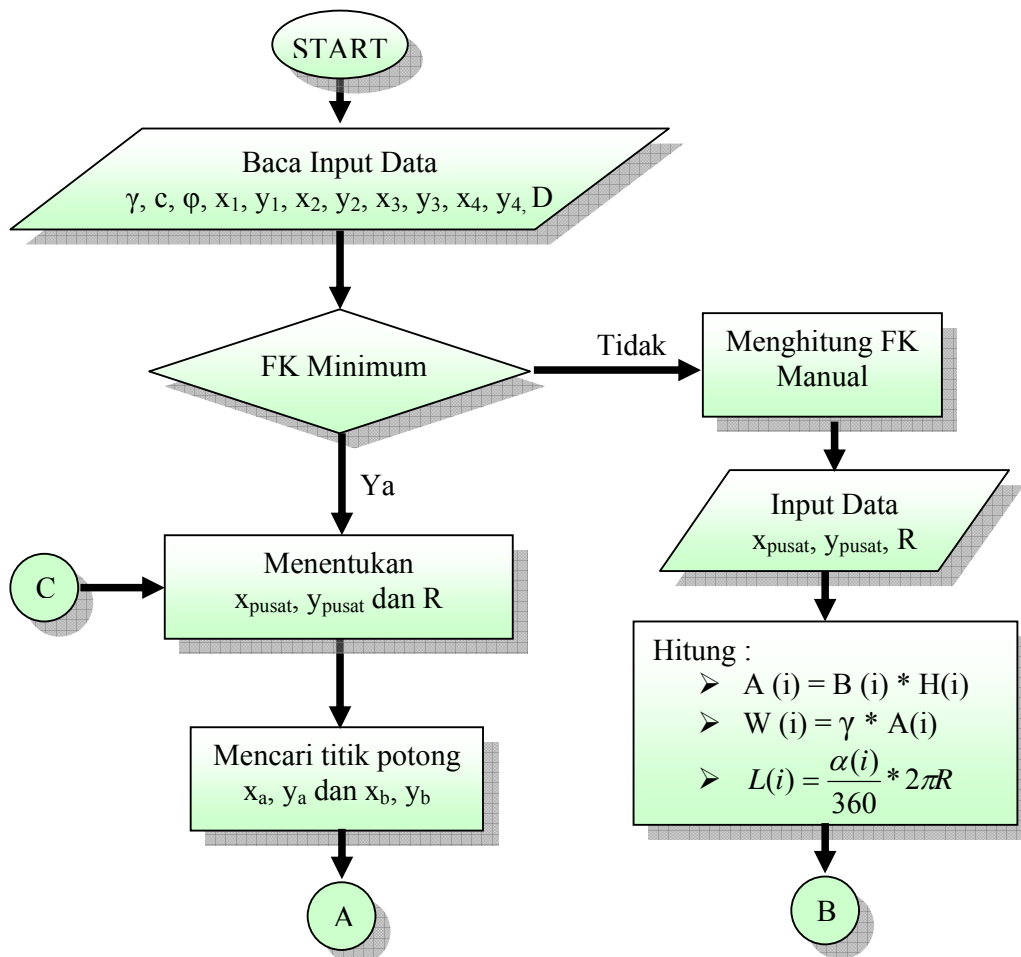


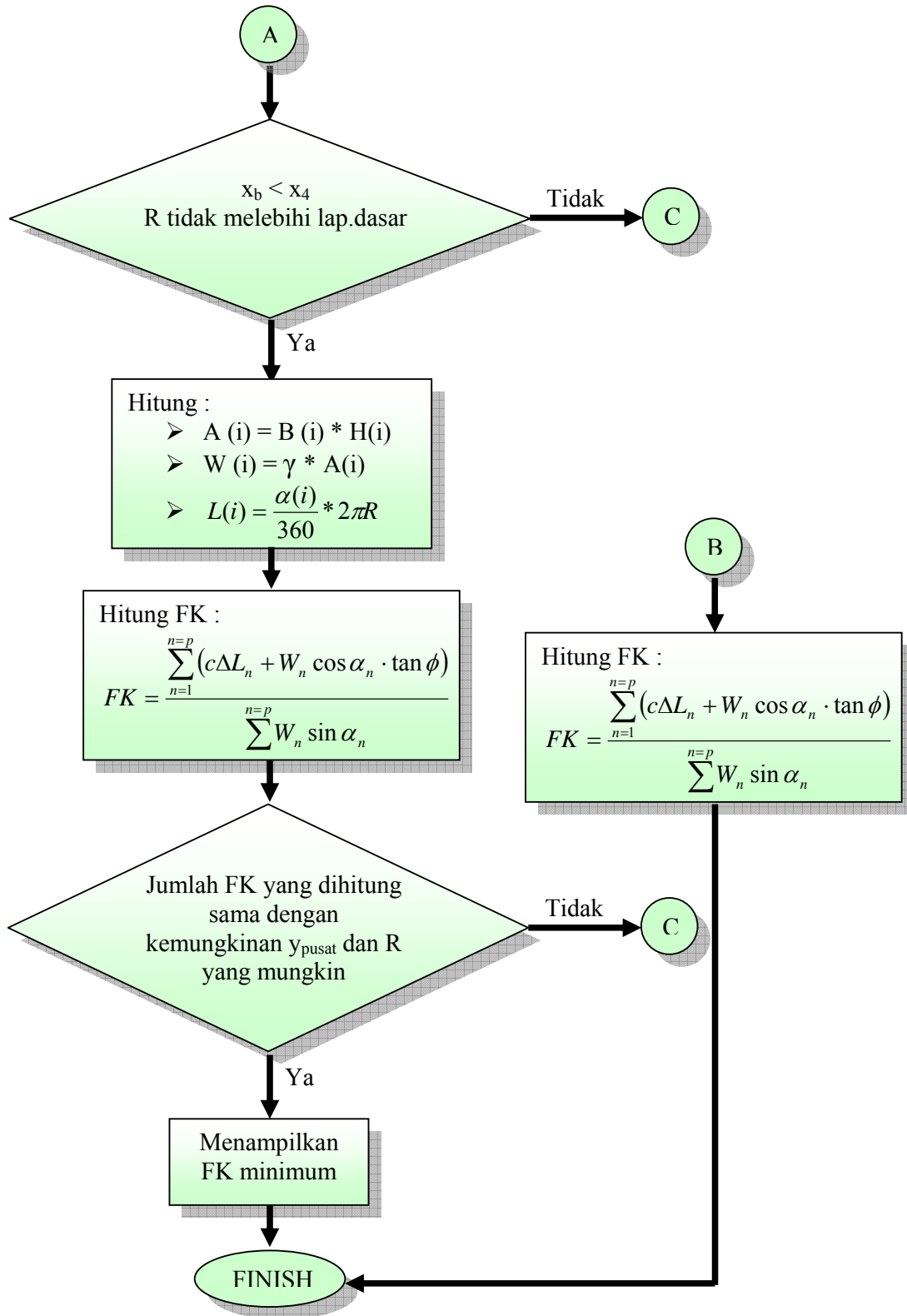
Gambar 2.16. Algoritma metode bagidua

BAB III METODOLOGI

3.1. ALUR PROGRAM (FLOW CHART)

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, bahwa tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis suatu kasus stabilitas lereng. Analisis stabilitas lereng tergantung pada perhitungan besarnya faktor keamanan dari lereng tersebut. Oleh karena itu fokus pembahasan dalam penelitian ini ditekankan pada analisis perhitungan besarnya faktor keamanan lereng. Dimana dari hasil perhitungan faktor keamanan tersebut dapat diketahui apakah lereng tersebut cukup aman atautkah diperlukan suatu perkuatan. Analisis diatas dapat dijabarkan melalui bagan (*flow chart*) sebagai berikut :

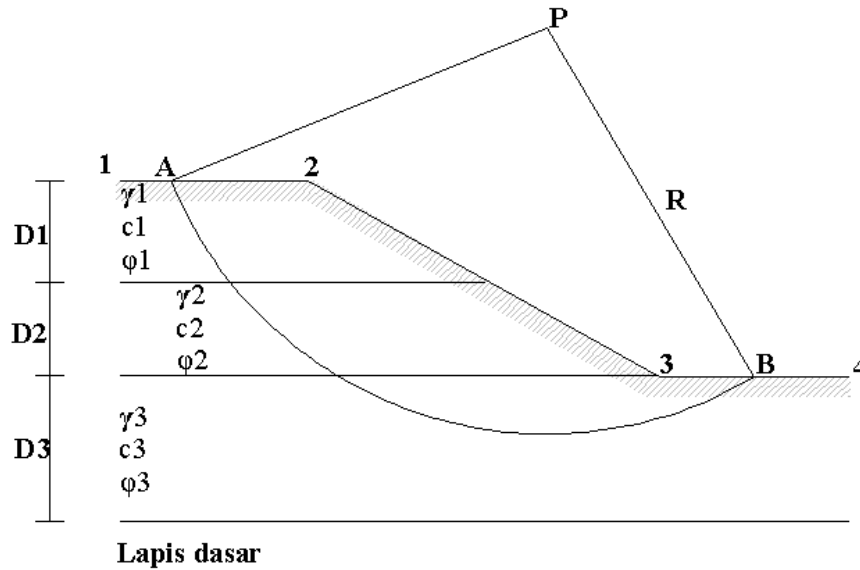




3.2. PENJELASAN ALUR PROGRAM

a) Pemodelan bentuk lereng

Mendesain geometri lereng dengan pendekatan desain secara teknis disertai dengan koordinat masing-masing titik yaitu Titik 1 (x_1, y_1), Titik 2 (x_2, y_2), Titik 3 (x_3, y_3), Titik 4 (x_4, y_4). Seperti terlihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1. Gambar pendekatan teknis lereng

b) Pembacaan data

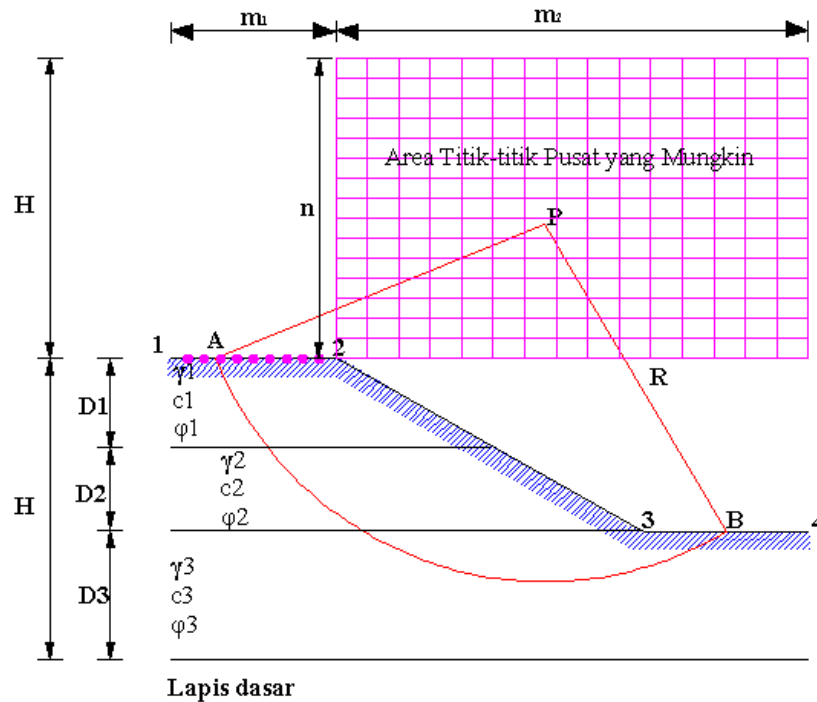
Pembacaan data dari parameter desain yaitu propertis tanah :

- γ tanah, c kohesi tanah, ϕ sudut geser tanah masing-masing lapisan tanah.
- Jumlah lapisan tanah beserta tebal lapisan (D) tiap lapisan tanah.

c) Menentukan daerah pusat rotasi.

Daerah pusat rotasi ditentukan yaitu daerah ($m \times n$) dimana panjang n sama dengan H yaitu kedalaman lereng dari permukaan hingga lapisan terakhir atau lapisan dasar. Sedangkan m sama dengan jarak horisontal antara titik 2 sampai dengan 4. Penentuan daerah pusat rotasi ini berdasarkan hasil perhitungan-perhitungan FK yang sudah ada sebelumnya baik dari literatur maupun perhitungan manual yaitu dengan

memperhatikan daerah-daerah yang kemungkinannya tinggi sebagai pusat rotasi lingkaran longsor.



Gambar 3.2. Menentukan daerah pusat rotasi

d) Menentukan titik pusat rotasi $P(x_{pusat}, y_{pusat})$.

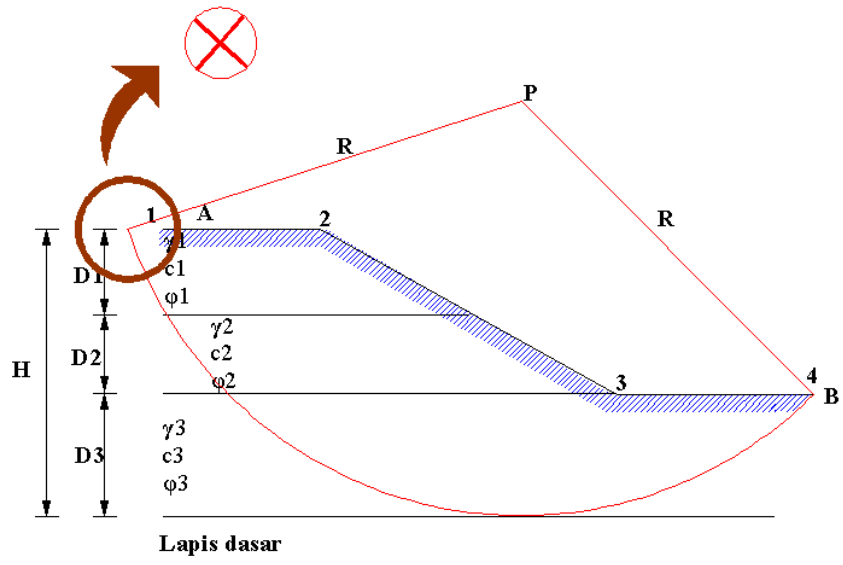
Penentuan titik pusat rotasi lingkaran longsor ditentukan secara acak oleh program komputer pada daerah yang sudah ditentukan sebanyak kemungkinan pusat rotasi yang memenuhi batasan yang sudah ditentukan.

e) Menentukan besarnya jari-jari lingkaran longsor (R).

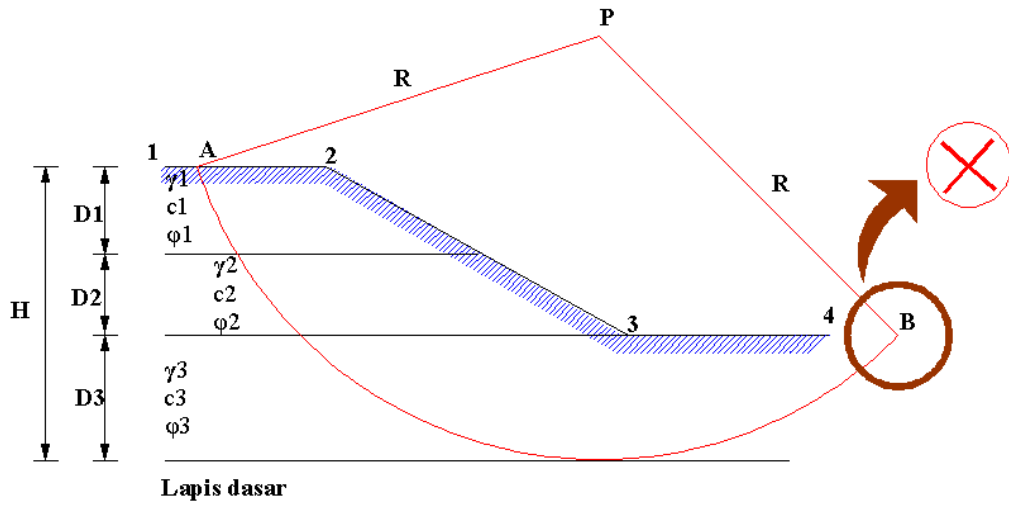
Jari-jari lingkaran longsor ditentukan dengan batasan-batasan sebagai berikut :

- $x_a > x_1$
- $x_b < x_4$
- R tidak lebih panjang daripada H

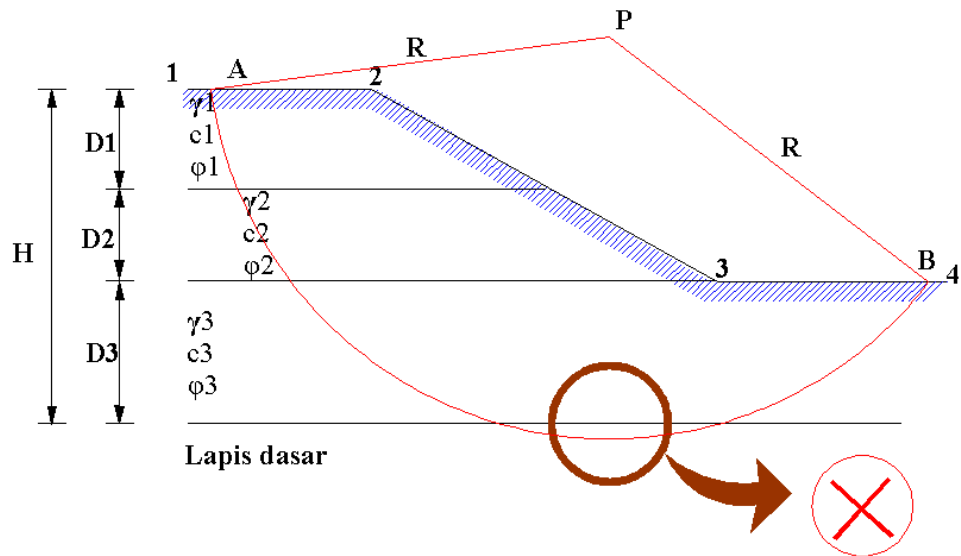
Secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 3.3, Gambar 3.4 dan Gambar 3.5 sebagai berikut :



Gambar 3.3. Batasan menentukan jari-jari 1



Gambar 3.4. Batasan menentukan jari-jari 2



Gambar 3.5. Batasan menentukan jari-jari 3

f) Menentukan titik-titik potong bidang gelincir.

Untuk menentukan titik-titik potong bidang gelincir dengan garis lereng maupun dengan garis lapisan dengan cara membuat suatu fungsi dari persamaan yang akan dicari titik potongnya. Misalnya dengan membuat fungsi $f(x)$ dan $g(x)$. penyelesaian dari kedua fungsi tersebut merupakan titik potong dari kedua persamaan tersebut. Jika fungsi-fungsi yang dicari penyelesaiannya merupakan fungsi kuadrat $f(x) = ax^2 + bx + c$ maka penyelesaiannya dapat dipakai metode eliminasi atau metode yang lain. Jika fungsinya bukan persamaan kuadrat maka kami menyelesaikan dengan pendekatan numerik yaitu metode bagidua (*Bisection*) seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya.

g) Membagi pias.

Lereng yang berada di atas bidang gelincir dalam penelitian ini dibagi menjadi seratus pias-pias tegak. Garis m_1 dibagi menjadi sepuluh titik, garis m_2 dan n masing-masing dibagi menjadi lima belas titik. Dari hasil analisis yang sudah kami lakukan dengan program komputer pembagian pias dan titik ini sudah cukup didapatkan hasil akurat. Jika menginginkan hasil yang lebih akurat lagi dapat dilakukan dengan

pembagian yang lebih teliti. Akan tetapi program komputer menjadi sangat berat akibat proses iterasinya yang terlalu banyak.

h) Jika ingin menghitung FK secara otomatis maka dilanjutkan dengan perhitungan FK secara otomatis seperti pada langkah (i) dan selanjutnya. Jika ingin menghitung FK secara manual dengan menginput x_{pusat} , y_{pusat} dan R. Dilanjutkan dengan menghitung luas (A), berat tanah (W), dan panjang busur (L) bidang longsor dari tiap-tiap pias (*slice*) yang secara lengkap seperti pada langkah (j). Kemudian menghitung FK yang secara lengkap seperti pada langkah (k).

i) Perhitungan FK secara otomatis dengan cara menentukan x_{pusat} , y_{pusat} dan R secara coba-coba dengan syarat :

- $y_{pusat} > y_1$ (y_{pusat} lebih besar dari y titik 1)
- $x_b > x_4$
- R tidak melebihi lapisan dasar

Jika tidak memenuhi syarat maka iterasi diulang dengan mengambil x_{pusat} , y_{pusat} dan R yang memenuhi syarat.

j) Perhitungan luas, berat tanah dan panjang busur lingkaran longsor dari tiap-tiap pias.

- Luas $A(i) = B(i) * H(i)$
- Berat tanah $W(i) = \gamma * A(i)$

- Panjang busur $L(i) = \frac{\alpha(i)}{360} * 2\pi R$

k) Perhitungan Faktor Keamanan dengan rumus :

$$FK = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c\Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \cdot \tan \phi)}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$

l) Perhitungan FK diulang untuk semua kemungkinan x_{pusat} , y_{pusat} dan R yang memenuhi syarat.

m) Menampilkan FK minimum.

n) Selesai.

BAB IV

VALIDASI PROGRAM

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa hasil dari penelitian ini adalah program komputer yang dapat digunakan untuk menganalisis stabilitas dari suatu lereng. Oleh karena itu sebagai sebuah program komputer baru yang nantinya akan digunakan sebagai alat bantu dalam menganalisis stabilitas lereng, maka program ini perlu dilakukan suatu validasi. Validasi dilakukan dengan cara membandingkan antara hasil analisis secara manual dan hasil analisis dengan menggunakan program komputer ini. Dengan demikian diharapkan program komputer dari hasil penelitian ini nantinya dapat digunakan untuk analisis stabilitas lereng secara aman dan dapat dipertanggungjawabkan keakuratannya setelah melalui tahap validasi ini.

4.1. Validasi Program dengan Hasil Perhitungan Teoritis

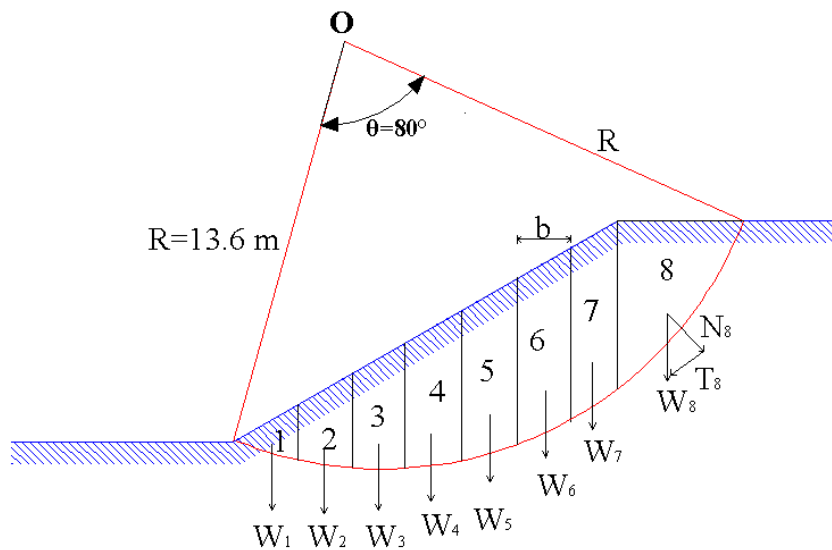
Program ini mempunyai dua pilihan penyelesaian yaitu penyelesaian untuk mendapatkan FK manual dan penyelesaian untuk mendapatkan FK minimum. Program FK manual adalah perhitungan program komputer dengan titik pusat koordinat lingkaran longsor beserta jari-jarinya sudah ditentukan sebelumnya. Sedangkan perhitungan program FK minimum adalah perhitungan program dengan koordinat titik pusat dan jari-jari bidang gelincir yang dilakukan dengan iterasi untuk mendapatkan lingkaran longsor dengan faktor keamanan minimum.

Validasi program ini dilakukan dengan cara menyelesaikan analisis stabilitas lereng dengan menggunakan program komputer dan selanjutnya dibandingkan dengan hasil dari analisis stabilitas lereng secara teoritis. Hasil perhitungan dengan menggunakan program komputer dilakukan dengan menentukan koordinat titik pusat dan jari-jari untuk mendapatkan FK manual dan perhitungan dengan menggunakan pilihan program FK minimum untuk mendapatkan FK minimum .

a. Kasus 1

Pada Gambar 4.1, suatu galian sedalam 8 m dengan sudut kemiringan 30° direncanakan untuk jalan raya. Pada permukaan atas galian terjadi keretakan tetapi diabaikan. Jika tanah mempunyai data sebagai berikut (Sri Prabandiyani dkk, 2004):

- Berat isi tanah (γ) = 21 kN/m³
- Kohesi tanah (c) = 30 kN/m²
- Sudut geser dalam (ϕ) = 5°



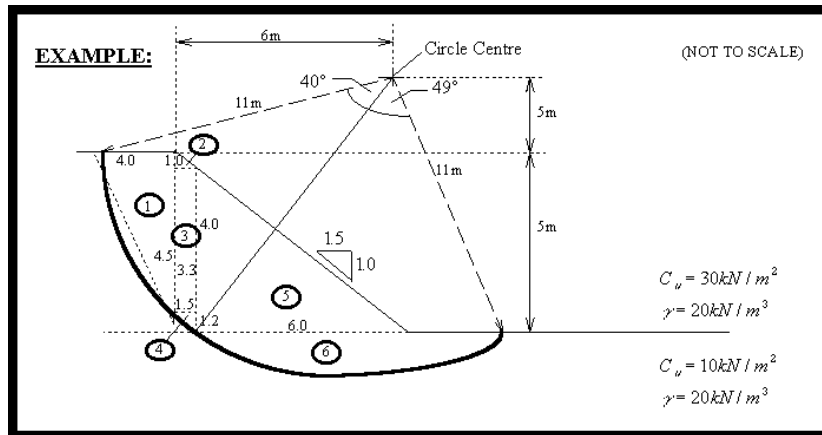
Gambar 4.1. Kasus stabilitas lereng 1

Tabel 4.1.

Hasil analisis stabilitas lereng teoritis, program FK Manual, program FK Minimum dan perhitungan manual kasus 1

No.	Sumber	FK	Jari-jari (R)	Titik Pusat	
				X	Y
1.	Teoritis (Sri Prabandiyani,dkk)	1.51	13.6	20.5	14.3
2.	Program FK Manual	1.63233	13.6	20.5	14.3
3.	Program FK Minimum	1.45972	16.73	18.78	16.8
4.	Perhitungan Manual	1.46440	16.73	18.78	16.8

c. Kasus 3



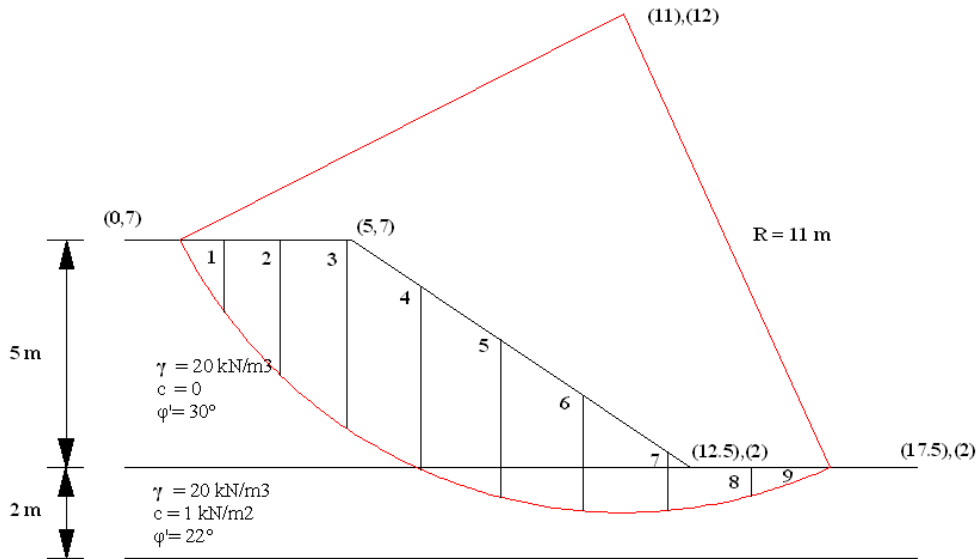
Gambar 4.3. Kasus stabilitas lereng 3

Tabel 4.3.

Hasil analisis stabilitas lereng teoritis, program FK Manual, program FK Minimum dan perhitungan manual kasus 3

No.	Sumber	FK	Jari-jari (R)	Titik Pusat	
				X	Y
1.	Teoritis (Taylor)	1.37000	11.00	11.00	12.00
2.	Program FK Manual	1.31104	11.00	11.00	12.00
3.	Program FK minimum	1.01354	8.86	9.17	8.87
4.	Perhitungan Manual	1.04380	8.86	9.17	8.87

d. Kasus 4



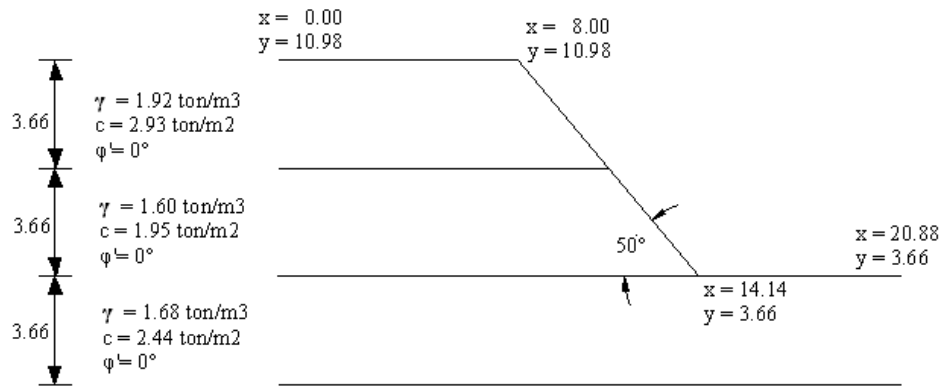
Gambar 4.4. Kasus stabilitas lereng 4

Tabel 4.4.

Hasil analisis stabilitas lereng teoritis, program FK Manual, program FK Minimum dan perhitungan manual kasus 4

No.	Sumber	FK	Jari-jari (R)	Titik Pusat	
				X	Y
1.	Teoritis (Taylor)	1.27000	11.000	11.00	11
2.	Program FK Manual	1.39231	11.000	11.00	11
3.	Program FK Minimum	0.92941	11.271	13.33	14
4.	Perhitungan Manual	0.93790	11.271	13.33	14

e. Kasus 5



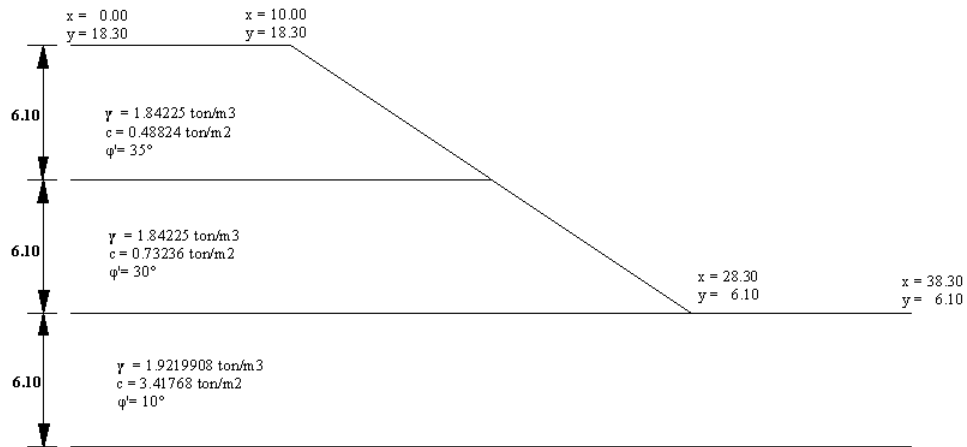
Gambar 4.5. Kasus stabilitas lereng 5

Tabel 4.5.

Hasil analisis stabilitas lereng perhitungan manual dengan program FK minimum komputer kasus 5

No.	Sumber	FK	Jari-jari (R)	Titik Pusat	
				X	Y
1.	Program FK Minimum	0.98191	11.614	13.152	15.372
2.	Perhitungan Manual	1.02210	11.614	13.152	13.152

f. Kasus 6



Gambar 4.6. Kasus stabilitas lereng 6

Tabel 4.6.

Hasil analisis stabilitas lereng perhitungan manual dengan program FK minimum komputer kasus 6

No.	Sumber	FK	Jari-jari (R)	Titik Pusat	
				X	Y
1.	Program FK Minimum	1.3466	19.4125	26.98	25.62
2.	Perhitungan Manual	1.3417	19.4125	26.98	25.62

Tabel 4.7.

Perbandingan antara analisis stabilitas lereng teoritis, program FK Manual, perhitungan manual dengan program FK Minimum komputer

Kasus	FK				Selisih FK Hit. Manual dg FK Minimum (%)	Sumber
	Teoritis	Manual	Minimum	Perhit. Manual		
1	1.51	1.63233	1.45876	1.4644	0.385	Sri Prabandiyani,dkk
2	1.55	1.52749	1.49824	1.5122	0.923	Braja M.Das
3	1.37	1.31104	1.01354	1.0438	2.898	Taylor
4	1.27	1.39231	0.92941	0.9379	0.905	Taylor
5	-	-	0.98191	1.0221	3.932	-
6	-	-	1.3466	1.3417	0.364	-
Selisih Rata-rata :					1.568	

Dari Tabel 4.1 menunjukkan bahwa hasil analisis stabilitas lereng dengan perkuatan nailing secara teoritis dengan program komputer dari beberapa contoh yang dianalisis mempunyai selisih rata-rata 1.57%, perbedaan itu dapat terjadi disebabkan beberapa faktor antara lain :

- Pembulatan angka di belakang koma.
- Toleransi dalam mencari akar.
- Diskretisasi.
- Tingkat ketelitian perhitungan luasan pias.
- Banyaknya iterasi yang dilakukan.

4.2. Pembahasan Validasi Program

Hasil analisis antara menggunakan program dan perhitungan teoritis dari buku referensi menunjukkan selisih atau perbedaan rata-rata 1.57%. Hal ini dikarenakan tingkat ketelitian perhitungan analisis komputer misalnya pada perhitungan luasan dari pias-pias pada perhitungan dengan program membagi

luas tanah menjadi pias-pias yang lebih banyak bila dibandingkan dengan cara manual yang membagi pias yang biasanya kurang dari 10 pias.

Dari hasil validasi di atas maka dapat diambil kesimpulan bahwa program komputer ini dapat digunakan untuk menganalisis berbagai jenis lereng. Hasil yang diperoleh dari hasil analisis program komputer ini dapat dipertanggungjawabkan.

BAB V

PENUTUP

5.1. KESIMPULAN

Dari hasil analisis berbagai kasus stabilitas lereng dengan menggunakan Program Analisis Stabilitas Lereng maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Perhitungan faktor keamanan stabilitas lereng membutuhkan ketelitian dan membutuhkan proses iterasi sehingga diperoleh angka keamanan yang paling minimum. Dengan program stabilitas lereng ini dapat mempermudah dan mempersingkat waktu dalam perhitungan faktor keamanan suatu lereng.
2. Dengan hasil faktor keamanan kritis yang diperoleh dari program cukup akurat dan lebih konservatif.
3. Program ini dapat digunakan untuk menyelesaikan kasus stabilitas lereng dengan *multilayer*.
4. Program ini cukup baik, efisien dan teliti untuk dipakai dalam analisis stabilitas lereng dengan tingkat kesalahan rata-rata 1.57%.

5.2. SARAN

1. Pengembangan program perlu dilanjutkan pada kasus lereng yang lebih kompleks dilengkapi dengan metode perkuatan yang dapat digunakan.
2. Perlu dikembangkan program analisis perhitungan untuk lereng dengan geometri yang lebih bervariasi dan pendekatan pemodelan lereng yang sesuai atau mendekati dengan kondisi sebenarnya di lapangan.
3. Program belum memperhitungkan pengaruh air tanah, beban dan retak permukaan sehingga program perlu dikembangkan lebih lanjut agar dapat menyelesaikan kasus-kasus stabilitas lereng yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Departemen Pekerjaan Umum. (1987). *Petunjuk Perencanaan Penganggulangan Longsoran*, SKBI – 2.3.06., Yayasan Badan Penerbit PU.
- Gulhati, Shashi K. and Datta, Manoj. (2005). *Geotechnical Engineering*, Tata McGraw-Hill Publishing Company : New Delhi.
- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE /September 2003 page 819-821.
- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE/February 2003 Page 118-121.
- M. Das, Braja. (2002). *Principles of Geotechnical Engineering*, Edisi ke- 5, Wadsworth Group : USA.
- Sosrodarsono, Suyono. (2000). *Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi*, PT. Pradnya Paramita : Jakarta.