BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas *(loose)*, yang terletak di atas batuan dasar *(bedrock)*. Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap diantara partikel-partikel. Ruang diantara partikel-partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya. Proses palapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi di dekat permukaan bumi membentuk tanah. Pembentukan tanah dari batuan induknya, dapat berupa proses fisik maupun kimia. Proses pembentukan tanah secara fisik yang mengubah batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, terjadi akibat pengaruh erosi, angin, air, es, manusia, atau hancurnya partikel tanah akibat perubahan suhu atau cuaca. Partikel-partikel mungkin berbentuk bulat, bergerigi maupun bentuk-bentuk diantaranya. Umumnya, pelapukan akibat proses kimia dapat terjadi oleh pangaruh oksigen, karbondioksida, air (terutama yang mengandung asam atau alkali) dan proses-proses kimia yang lain. Jika hasil pelapukan masih berada di tempat asalnya, maka tanah ini disebut *tanah residual (residual soil)* dan apabila tanah berpindah tempatnya, disebut *tanah terangkut (transported soil)* (Hardiyatmo, 2010:1).

Istilah pasir, lempung, lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas ukuran butiran yang telah ditentukan. Akan tetapi, istilah yang sama juga digunakan untuk menggambarkan sifat tanah yang khusus. Sebagai contoh, lempung adalah jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedangkan pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis (Hardiyatmo, 2010:1).

Kebanyakan jenis tanah terdiri dari banyak campuran, atau lebih dari satu macam ukuran partikel. Tanah lempung belum tentu terdiri dari partikel lempung saja, akan tetapi dapat bercampur dengan butiran-butiran ukuran lanau maupun pasir, dan mungkin terdapat campuran bahan organik. Ukuran partikel tanah dapat bervariasi dari lebih besar dari 100 mm sampai dengan lebih kecil dari 0,001 mm. Tabel 2.1. menunjukkan batas-batas interval ukuran butiran lampung, lanau, pasir, dan kerikil menurut *Unified Soil Classification System*, *ASTM*, *MIT*, dan *International Nomenclature* (Hardiyatmo, 2010:2).

Tabel 2.1. Klasifikasi Butiran Tanah Menurut *Unified Soil Classification System, ASTM, MIT,* dan *International Nomenclature.*

	1,7 mm		0,38	0,075							
Unifed Class System	Kasar	Sedang	Halus	Butiran halus (lanau dan lempung)							
	2,0 mm	0,420	0,075	0,005	0,001						
ASTM	Pasir sedang	Pasir halus	Lanau	Lempung	Lempung Koloidal						
	2,0 mm										
MIT Nomen-clature	Kasar	Sedang	Halus	Kasar	Sedang	Halus	Kasar	Sedang	Halus		
	2,0 mm	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,006	0,002	0,0006	0,0002
Inter-national Nomen-clature	Sangat kasar	Kasar	Sedang	Halus	Kasar	Halus	Kasar	Halus	Kasar	Halus	Sangat Halus
	Pasir				Mo		Lanau		Lempung		

Sumber : Hardiyatmo (2010:2)

2.1.1. Klasifikasi Tanah

Umumnya, penentuan sifat-sifat tanah banyak dijumpai dalam masalah teknis yang berhubungan dengan tanah (Hardiyatmo, 2010:58). Hasil dari penyelidikan sifat-sifat ini kemudian dapat digunakan untuk mengevaluasi masalah-masalah tertentu seperti :

1. Penentuan penurunan bangunan, yaitu dengan menentukan komposisi permeabilitas tanah. Dari sini, selanjutnya digunakan dalam persamaan penurunan yang didasarkan pada teori konsilidasi, misalnya teori Terzaghi.
2. Penentuan kecepatan air yang mengalir lewat benda uji guna menghitung koefisien permeabilitas. Dari sini kemudian dihubungkan dengan Hukum Darcy dan jaring arus *(flownet)* untuk menentukan debit aliran yang lewat struktur tanah.
3. Untuk mengevaluasi stabilitas tanah yang miring, yaitu dengan menentukan kuat geser tanah. Dari sini kemudian disubstitusikan dalam rumus statika (stabilitas lereng).

Dalam banyak masalah teknis (semacam perencanaan perkerasan jalan, bendungan dalam urugan, dan lain-lainnya), pemilihan tanah-tanah ke dalam kelompok ataupun sebkelompok yang menunjukan sifat atau kelakuan yang sama akan sangat membantu. Pemilihan ini disebut klasifikasi. Klasifikasi tanah sangat membantu perancang dalam memberikan pengarahan melalui cara empiris yang tersedia dan hasil pengalaman yang telah lalu. Tetapi, perancang harus barhati-hati dalam menerapkannya karena penyelesaian

masalah stabilitas, kompresi (penurunan), aliran air yang didasarkan pada klasifikasi tanah sering menimbulkan kesalahan yang berarti.

Kebanyakan klasifikasi tanah menggunakan indeks tipe pengujian yang sangat sederhana untuk memperoleh karakteristik tanah. Karakteristik tersebut digunakan untuk menentukan kelompok klasifikasi. Umumnya, klasifikasi tanah didasarkan atas ukuran partikel yang memperoleh dari analisis saringan (dan uji sedimentasi) dan plastisitas.

Terdapat dua sistem klasifikasi yang sering digunakan, yaitu Unified Soil Classification *System* dan AASHTO *(American Association of State Highway and Transportation Officials).* Sistem-sistem ini menggunakan sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran, batas cair dan indeks plastisitas. Klasifikasi tanah dari Sistem *Unified*mula pertama diusulkan oleh *Casagrande* (1942), kemudian direvisi oleh kelompok teknisi dari USBR *(United State Bureau of Reclamation).* Dalam bentuk yang sekarang, system ini banyak digunakan oleh berbagai organisasi konsultan geoteknik (Hardiyatmo, 2010:59).

2.1.2. Sistem Klasifikasi *Unified*

Pada sistem *Unified,* tanah diklasifikasikan ke dalam tanah berbutiran kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% lolos saringan nomer 200, dan sebagai tanah berbutiran halus (lanau/lempung) jika lebih dari 50% lolos saringan nomer 200. Selanjutnya, tanah diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan subkelompok yang dapat di lihat dalam Tabel 2.3. Simbol-simbol yang digunakan tersebut adalah :

G = kerikil *(gravel)*
S = Pasir *(sand)*
C = lempung *(clay)*
M = lanau *(silt)*
O = lanau atau lempung organic *(organic silt or clay)*
Pt = tanah gambut dan tanah organik tinggi *(peat and highly organic soil)*
W = gradasi baik *(well-graded)*
P = gradasi buruk *(poorly-graded)*
H = plastisitas tinggi *(high-plasticity)*
L = plastisitas rendah *(low-plasticity).*

Berikut ini diterangkan cara penggunaan Tabel 2.3. misalnya, dari hasil pengujian di laboratorium diperoleh data : batas plastis (PL) = 16%; batas cair (LL) = 42%, sedang dari analisis saringan diperoleh data seperti dalam tabel berikut :

Tabel 2.2. Analisis Saringan

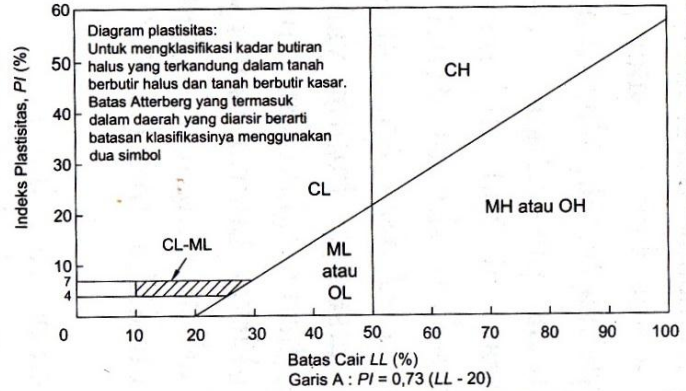
Nomor saringan	% butiran lolos
4 (4,75 mm)	100,0
10 (2,0 mm)	93,2
40 (0,42 mm)	81,0
200 (0,075 mm)	61,5

Sumber : Hardiyatmo (2010:60)

Karena persentase lolos saringan nomer 200 adalah 61,5%, yang berarti lebih besar dari 50%, maka dalam Tabel 2.3. harus digunakan kolom bawah yaitu butiran halus. Karena nilai LL = 42% (lebih kecil dari 50%), maka termasuk CL atau ML.

Selanjutnya, ditentukan nilai indeks plastisnya, PI = LL – PL atau PI = 42% – 16% = 26%. Nilai-nilai PI dan LL, kemudian digambar pada diagram plastisitas, sehingga akan ditemukan letak titik di atas garis A, yang menempati zona CL. Jadi, tanah tersebut dapat diklasifikasikan sebagai CL (lempung anorganik plastisitas rendah).

Tabel 2.3. Sistem Klasifikasi Tanah *Unified*

Divisi Utama			Simbol Kelompok	Nama Jenis		Kriteria laboratorium	
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih tertahan saringan no. 200 (0,075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir - kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus, kurang dari 5% lolos saringan no. 200 : GW, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan no.200 : GM, GC, SM, SC. 5% - 12% lolos saringan no. 200 : Batasan klasifikasi yang mempunyai simbol dobel	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3	
			GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kriteria untuk GW	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung		Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau *PI* < 4	Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung		Batas-batas Atterberg di atas garis A atau *PI* > 7	
	Pasir lebih dari 50 % fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3	
			SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kriteria untuk SW	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau		Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau *PI* < 4	Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung		Batas-batas Atterberg di atas garis A atau *PI* > 7	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50 % atau kurang		ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung			
			CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ("*lean clays*")			
			OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah			
	Lanau dan lempung batas cair > 50 %		MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis			
			CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ("*fat clays*")			
			OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi			
Tanah dengan kadar organik tinggi			P_t	Gambut ("*peat*") dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi		Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di *ASTM Designation* D-2488	

Sumber : Hardiyatmo (2010:61)

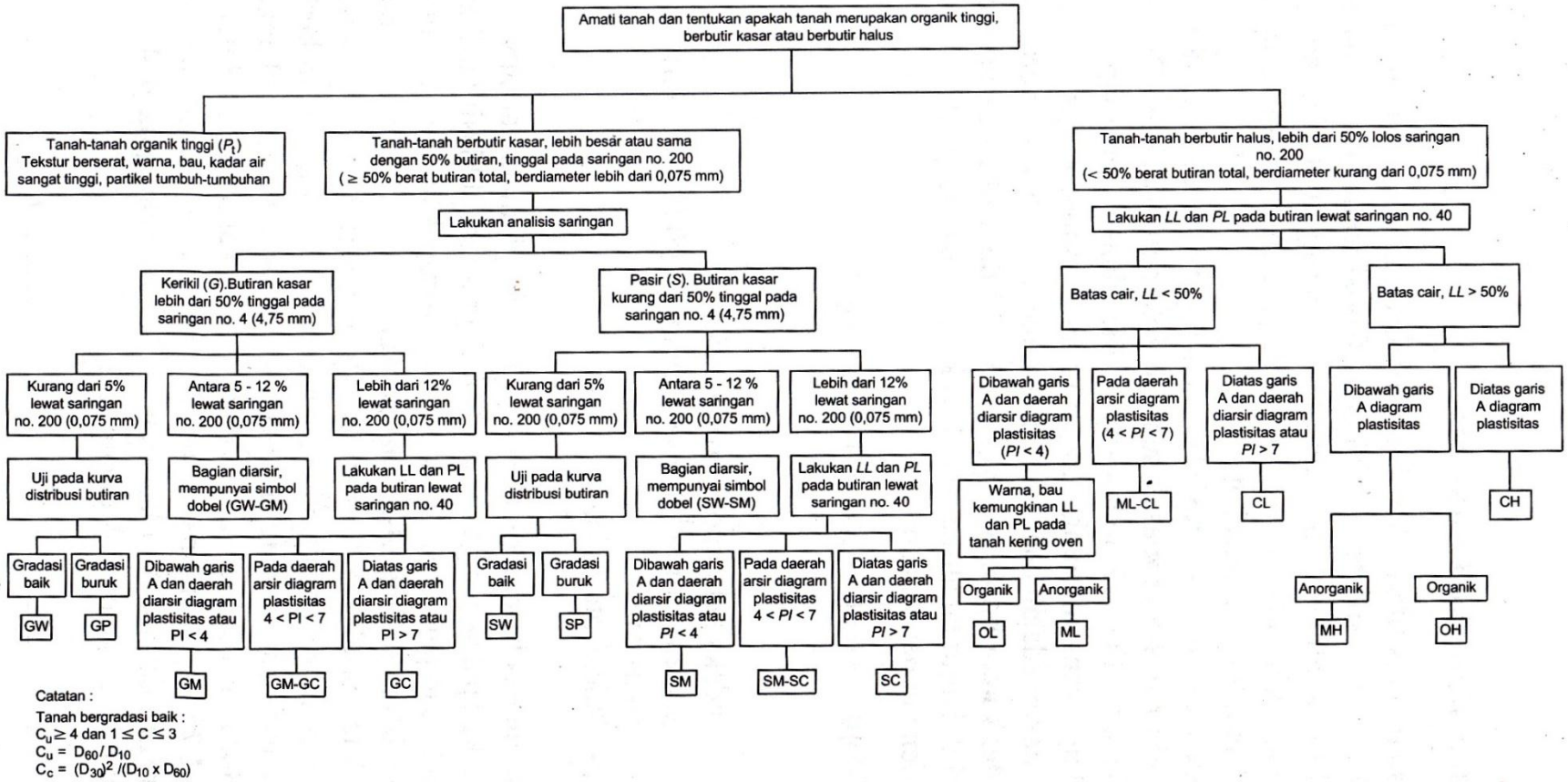
Prosedur untuk menentukan klasifikasi tanah Sistem *Unified* adalah sebagai berikut:

1. Tentukan apakah tanah berupa butiran halus atau butiran kasar secara visual atau dengan cara menyaringnya dengan saringan nomer 200.
2. Jika tanah berupa butiran kasar :
   a. Saring tanah tersebut dan gambarkan grafik distribusi butiran.
   b. Tentukan persen butiran lolos saringan no. 4. Bila persentase butiran yang lolos kurang dari 50%, klasifikasikan tanah tersebut sebagai kerikil. Bila persen butiran yang lolos lebih dari 50%, klasifikasikan sebagai pasir.
   c. Tentukan jumlah butiran yang lolos saringan no. 200. Jika persentase butiran yang lolos kurang dari 5%, pertimbangkan bentuk grafik distribusi butiran dengan menghitung C_u dan C_c. Jika termasuk bergradasi baik, maka klasifikasikan sebagai GW (bila kerikil) atau SW (bila pasir). Jika termasuk bergradasi buruk, klasifikasikan sebagai GP (bila kerikil) atau SP (bila pasir). Jika persentase butiran tanah yang lolos saringan no.200 diantara 5 sampai 12%, tanah akan mempunyai simbol dobel dan mempunyai sifat keplastisan (GW – GM, SW – SM, dan sebagainya).
   d. Jika persentase butiran yang lolos saringan no.200 lebih besar 12%, harus dilakukan uji batas-batas Atterberg dengan menyingkirkan butiran tanah yang tinggal dalam saringan no.40. Kemudian, dengan menggunakan diagram plastisitas, ditentukan klasifikasinya (GM, GC, SM, SC, GM – GC atau SM – SC).
3. Jika tanah berbutir halus :
   a. Kerjakan uji batas-batas Atterberg dengan menyingkirkan butiran tanah yang tinggal dalam saringan no.40. Jika batas cair lebih dari 50, klasifikasikan sebagai H (plastisitas tinggi) dan jika kurang dari 50, maka klasifikasikan sebagai L (plastisitas rendah).
   b. Untuk H (plastisitas tinggi), jika plot batas-batas Atterberg pada grafik plastisitas di bawah garis A, tentukan apakah tanah organic (OH) atau anorganik (MH). Jika plotnya jatuh di atas garis A, klasifikasikan sebagai CH.
   c. Untuk L (plastisitas rendah), jika plot batas-batas Atterberg pada grafik plastisitas di bawah garis A dan area yang diarsir, tentukan klasifikasi tanah tersebut sebagai organik (OL) atau anorganik (ML) berdasar warna, bau, atau perubahan batas cair dan batas plastisnya dengan mengeringkannya di dalam oven.

d. Jika plot batas-batas Atterberg pada grafik platisitas jatuh pada area yang diarsir, dekat dengan garis A atau nilai LL sekitar 50, digunakan simbol dobel.

Cara penentuan klasifikasi tanah Sistem *Unified* dengan menggunakan diagram alir diperlihatkan dalam Gambar 2.1.

repository.ub.ac
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 2.1. Diagram Alir Sistem Klasifikasi *Unified*

Sumber : Hardiyatmo (2010:64)

Tabel 2.4. Sistem Klasifikasi AASHTO

Klasifikasi umum	Material granuler (< 35% lolos saringan no. 200)							Tanah-tanah lanau-lempung (> 35% lolos saringan no. 200)			
Klasifikasi kelompok	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5/A-7-6
Analisis saringan (% lolos)											
2,00 mm (no. 10)	50maks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,425 mm (no. 40)	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 mm (no. 200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	36 min	36 min
Sifat fraksi lolos saringan no. 40											
Batas cair (*LL*)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks plastis (*PI*)	6 maks		Np	10 maks	10 maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks kelompok (*G*)	0		0	0		4 maks		8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material yang pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik							Sedang sampai buruk			

Catatan :
Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas plastisnya (*PL*)
Untuk PL > 30, klasifikasinya A-7-5 ;
Untuk PL < 30, klasifikasinya A-7-6
Np = Nonplastis

Sumber : Hardiyatmo (2010:65)

2.1.3. Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO *(American Association of State Highway and Transportatio Officials Classification)* berguna untuk menentukan kualitas tanah dalam perancangan timbunan jalan, *subbase* dan *subgrade.* Sistem ini terutama ditunjukan untuk maksud-maksud dalam lingkungan tersebut.

Sistem klasifikasi AASHTO membagi tanah ke dalam 8 kelompok, A-1 sampai A-8 termasuk sub-sub kelompok (Tabel 2.4) tanah-tanah dalam tiap kelompoknya dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris. Pengujian yang digunakan adalah analisis saringan dan batas-batas Atterberg (Hardiyatmo, 2010:63).

Indeks kelompok *(group index)* (GI) digunakan untuk mengevaluasi lebih lanjut tanah-tanah dalam kelompoknya, indeks kelompok dihitung dengan persamaan :

$$GI = (F-35)\{0,2 + 0,005(LL-40)\} + 0,001\,(F-15)(PI-10) \quad \text{.....} \quad (2\text{-}1)$$

dimana :

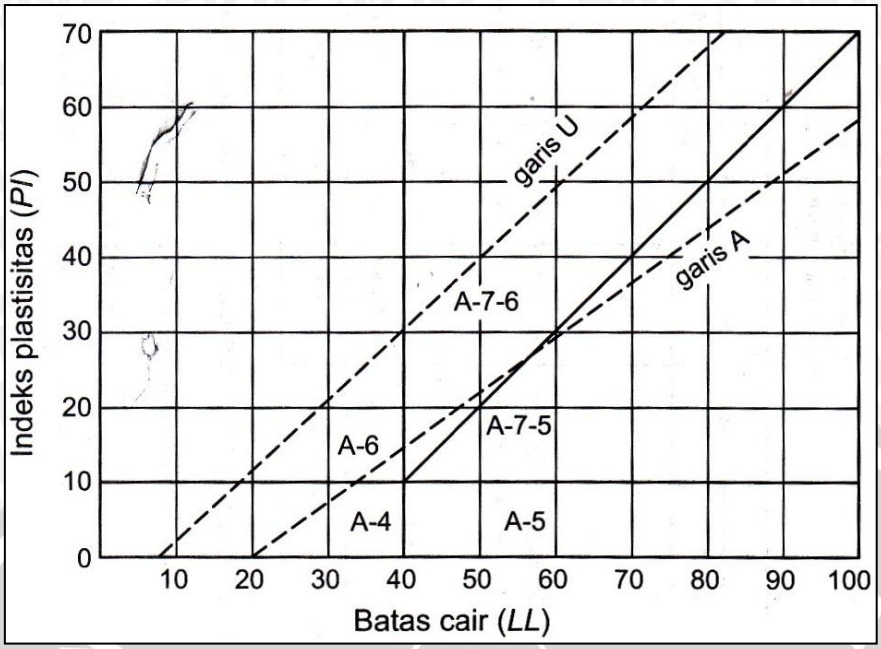
GI = indeks kelompok *(group index)*

F = persen butiran lolos saringan no. 200 (0,075 mm)

LL = batas cair

PI = indeks plastisitas

Bila indeks kelompok (GI) semakin tinggi, maka tanah semakin berkekurangan ketepatan penggunaan. Tanah granuler diklasifikasikan kedalam A-1 sampai A-3. Tanah A-1 merupakan tanah granuler bergradasi baik, sedang A-3 adalah pasir bersih bergradasi buruk. Tanah A-2 termasuk tanah granuler (kurang dari 35% lolos saringan no. 200), tapi masih mengandung lanau dan lempung. Tanah berbutir halus diklasifikasikan dari A-4 sampai A-7, yaitu tanah lempung-lanau.Beda keduanya didasarkan pada batas-batas Atterberg. Gambar 2.2. dapat digunakan untuk memperoleh batas-batas antara batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk kelompok A-4 sampai A-7 dan untuk sub kelompok dalam A-2.



Gambar 2.2. Batas-batas Atterberg untuk Subkelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7.
Sumber : Hardiyatmo (2010:66)

Dalam Gambar 2.2. garis-A dari Casagrande digambarkan bersama-sama dengan garis-U yang dinyatakan oleh persamaan : PI = 0,9 (LL-8). Garis-U ini adalah garis batas atas dari hubungan LL dan PI untuk tanah-tanah di alam pada umumnya (Holtz dan Kovacs, 1981). Tanah organik tinggi seperti tanah gambut *(Peat)* diletakkan dalam kelompok A-8. Hubungan antara sistem klasifikasi *Unified* dan AASHTO ditinjau dari kemungkinan-kemungkinan kelompoknya, diperlihatkan dalam Tabel 2.5a dan 2.5b.

Tabel 2.5a. Perbandingan Sistem *Unified* dengan Sistem AASHTO (Liu, 1970)

Kelompok tanah sistem *Unified*	**Kelompok tanah yang sebanding dengan sistem AASTHO**		
	Sangat mungkin	**Mungkin**	**Kemungkinan kecil**
GW	A-1-a	-	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GP	A-1-a	A-1-b	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6	A-4, A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
GC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6	A-4, A-7-6, A-7-5
SW	A-1-b	A-1-a	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SP	A-3, A-1-b	A-1-a	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6, A-4, A-5	A-6, A-7-6, A-7-6, A-1-a
SC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6, A-4, A-7-6	A-7-5
ML	A-4, A-5	A-6, A-7-5	-
CL	A-6, A-7-6	A-4	-
OL	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	-
MH	A-7-5, A-5	-	A-7-6
CH	A-7-6	A-7-5	-
OH	A-7-5, A-5	-	A-7-6
Pt	-	-	-

Sumber : Hardiyatmo (2010:68)

Tabel 2.5b. Perbandingan Sistem *Unified* dengan Sistem AASHTO (Liu, 1970)

Kelompok tanah sistem AASHTO	**Kelompok tanah yang sebanding dengan sistem *Unified***		
	Sangat mungkin	**Mungkin**	**Kemungkinan kecil**
A-1-a	GW, GP	SW, SP	GM, SM
A-1-a	SW, SP, GM, SM	GP	-
A-3	SP	-	SW, GP
A-2-4	GM, SM	GC, SC	SW, GP, SW, SP
A-2-5	GM, SM	-	SW, GP, SW, SP
A-2-6	GC, SC	GM, SM	SW, GP, SW, SP
A-2-7	GM, GC, SM, SC	-	SW, GP, SW, SP
A-4	ML, OL	CL, SM, SC	GM, GC
A-5	OH, MH, ML, OL	-	SM, GM
A-6	CL	ML, OL, SC	GC, GM, SM
A-7-5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, SM, GC, SC
A-7-6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM

Sumber : Hardiyatmo (2010:69)

2.2. Tanah Longsor

Tanah longsor atau dalam bahasa Inggris disebut *Landslide*, adalah perpindahan material pembentuk lereng berupa batuan, bahan rombakan, tanah atau material campuran tersebut, bergerak ke bawah atau keluar lereng. Proses terjadinya tanah longsor dapat diterangkan sebagai berikut : air yang meresap kedalam tanah akan menambah bobot tanah. Jika air tersebut menembus sampai tanah kedap air yang berperan sebagai bidang gelincir, maka tanah menjadi licin dan tanah pelapukan di atasnya akan bergerak mengikuti lereng dan keluar lereng (Anugrah, 2013:3).

2.2.1. Proses Fisik Terjadinya Tanah Longsor

Berhubungan dengan longsor, penting menggunakan klasifikasi untuk membedakan karakteristik yang berkaitan untuk digunakan pada akhir penelitian. Pihak yang bekerja pada The World Landslide Inventory (1990), telah mengupayakan untuk menstandarkan istilah dan mendefinisikan tanah longsor sekedar sebagai : *"Pegerakan massa batuan, bumi, dan puing-puing menuruni lereng"*. Definisi yang lebih menyeluruh yang dapat membantu untuk membedakan longsor dengan proses geomorfologi lainnya adalah *"gerakan ke bawah atau keluar dari massa material pembentuk lereng di bawah pengaruh gravitasi, yang terjadi di batas-batas diskrit dan menempatkan semula tanpa bantuan air sebagai agen transportasi"*. Tiga klasifikasi yang paling banyak digunakan berkaitan dengan longsor adalah (Sharpe 1938; Varnes 1958; 1978; Hutchinson 1988) dengan memisahkan ‘gerakan massa' menjadi dua kategori, yaitu : "penurunan" (yang merupakan materi yang tenggelam vertikal) dan gerakan-gerakan yang terjadi di lereng. "Pegerakan lereng" ini kemudian biasanya pertama menjadi "Tanah Longsor" seperti yang disefinisikan diatas. Dan yang kedua, dalam pegerakan lambat yang lebih luas dan yang tidak jelas seperti "merayap", "merosot" dan "mengelembung".

Dari semua klasifikasi tanah longsor yang berbeda-beda yang pernah ada, Sistem yang di buat oleh Varnes (1978) sering disukai karena pembuatannya cukup sederhana dan mudah untuk diterapkan di lapangan. Dalam menerapkan klasifikasi ini, penting untuk diingat bahwa kriteria material mengacu pada material asli lereng tersebut, bukan dengan apa yang akhirnya akan muncul dalam setoran (reruntuhan) (Anugrah, 2013:3).

2.2.2. Gerakan Massa Batuan

Yang dimaksud dengan gerakan massa disini adalah pergerakan massa batuan, termasuk dalamnya tanah/soil dan batuan, bahan-bahan lepas yang telah disiapkan oleh proses pelapukan, menuruni lereng. Pergerakan tersebut semata–mata karena gaya berat (Anugrah, 2013:4).

Faktor–faktor penyebab gerakan massa adalah :

- Gaya berat, sebagai sumber energi untuk menggerakan lapisan tanah atau batuan menuruni lereng.
- Air, berfungsi sebagai penambah besarnya gerakan juga sebagai penambah beban, sehingga dapat mempermudah gerakan.
- Gaya-gaya pengikis yang menghasilkan lereng menjadi curam
- Gempa bumi atau getaran-getaran lainnya
- Batuan yang tidak kompak atau batuan yang licin
- Batuan yang retak–retak karena kekar, sesar, foliasi
- Curah hujan yang besar
- Perubahan keadaan vegetasi penutup lahan (aktifitas manusia)

Pada massa batuan yang tidak kompak, pori-porinya sebagian diisi air dan sebagian lainnya diisi udara, sehingga kondisi batuan menjadi lembab. Dengan kondisi lembabnya ini maka akan menimbulkan kurangnya daya kohesi batuan tersebut.

Air tanah juga dapat mempengaruhi gerakan massa batuan. Gerakan air tanah dapat memberikan tekanan terhadap butiran-butiran tanah sehingga memperlemah kemantapan lereng. Selain itu, air tanah juga dapat melarutkan dan menghanyutkan bahan perekat sehingga memperlemah ikatan antar butir dan berkurangnya daya kohesi. Larut dan hanyutnya bahan perekat menghasilkan rongga-rongga dalam tanah dan ini juga akan mengurangi kemantapan tanah.

Tanah longsor (gerakan massa batuan) di Indonesia, umumnya terjadi di lereng terjal yang terbentuk dari endapan vulkanik yang tidak terpadatkan. Lereng-lereng terjal yang dipengaruhi struktur geologi seperti patahan, rekahan, lipatan, lebih rentan terhadap gejala longsor, apalagi jika arah pelapisan batuan searah dengan kemiringan lereng dan terdapat patahan aktif. Pelapisan batuan yang merupakan perselingan antara batuan yang kedap air dan batuan yang dapat menyerap air menciptakan bidang yang berpotensi sebagai bidang gelincir.

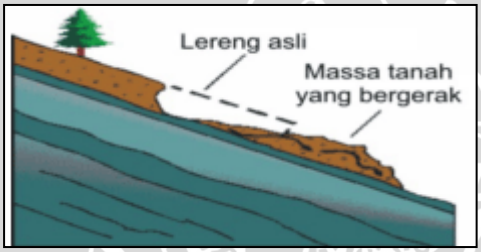
Dalam keseharian gerakan massa batuan disebut dengan peristiwa longsor. Peristiwa ini sangat bervariasi bila dilihat dari sisi akibatnya, yaitu ada yang berakibat ringan ada yang berakibat berat sampai menghilangkan nyawa dan menghancurkan pemukiman serta harta bendanya.

2.2.3. Jenis-jenis Tanah Longsor

Ada 6 jenis tanah longsor, yakni : longsoran translasi, longsoran rotasi, pergerakan blok, runtuhan batu, rayapan tanah, dan bahan rombakan. Jenis longsoran translasi dan rotasi paling banyak terjadi di Indonesia. Sedangkan longsoran yang paling banyak memakan korban jiwa manusia adalah aliran bahan rombakan.

1. Longsor Translasi

   Longsoran translasi adalah bergeraknya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk rata atau bergelombang landai.

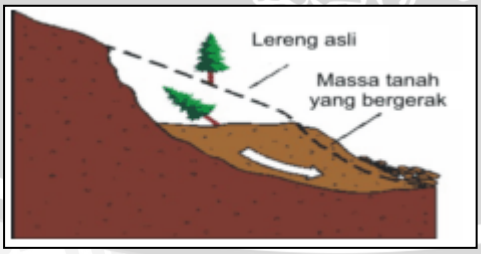


   Gambar 2.3. Longsor Translasi

   Sumber : ESDM. Pengenalan Gerakan Tanah (2008:2)

2. Longsoran Rotasi

   Longsoran rotasi adalah bergeraknya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk cekung.

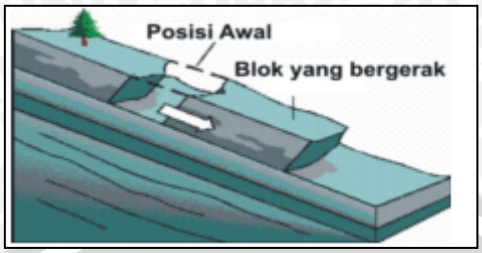


   Gambar 2.4. Longsor Rotasi

   Sumber : ESDM. Pengenalan Gerakan Tanah (2008:2)

3. Pergerakan Blok

Pergerakan blok adalah perpindahan batuan yang bergerak pada bidang gelincir berbentuk rata. Longsoran ini disebut juga longsoran translasi blok batu.



Gambar 2.5. Pergerakan Blok

Sumber : ESDM. Pengenalan Gerakan Tanah (2008:2)

4. Runtuhan Batu

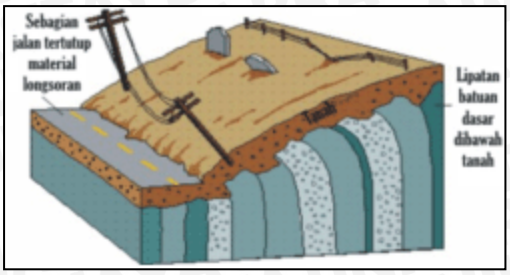
Runtuhan batu terjadi ketika sejumlah besar batuan atau material lain bergerak ke bawah dengan cara jatuh bebas. Umumnya terjadi pada lereng yang terjal hingga menggantung terutama di daerah pantai. Batu-batu besar yang jatuh dapat menyebabkan kerusakan yang parah.

Gambar 2.6. Runtuhan Batu

Sumber : ESDM. Pengenalan Gerakan Tanah (2008:2)

5. Rayapan tanah

Rayapan tanah adalah jenis tanah longsor yang bergerak lambat. Jenis tanahnya berupa butiran kasar dan halus. Jenis tanah longsor ini hampir tidak dapat dikenali, setelah waktu yang cukup lama longsoran jenis rayapan ini bisa menyebabkan tiang-tiang telopon, pohon, atau rumah miring ke bawah.

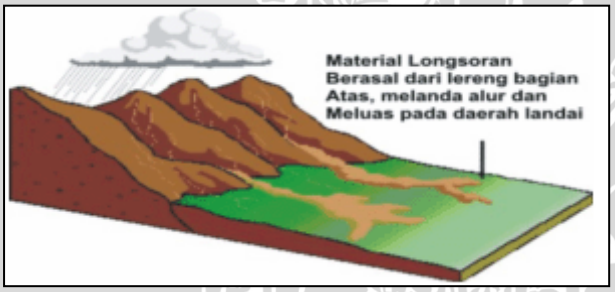


Gambar 2.7. Rayapan Tanah

Sumber : ESDM. Pengenalan Gerakan Tanah (2008:3)

6. Aliran Bahan Rombakan

Jenis tanah longsor ini terjadi karena massa tanah bergerak didorong oleh air. Kecepatan aliran tergantung pada kemiringan lereng, volume dan tekanan air, dan jenis materialnya. Gerakannya terjadi disepanjang lembah dan mampu mencapai ratusan meter jauhnya. Di beberapa tempat bisa sampai ribuan meter seperti di daerah aliran sungai disekitar gunung api. Aliran tanah ini dapat menelan korban cukup banyak.



Gambar 2.8. Aliran Bahan Rombakan

Sumber : ESDM. Pengenalan Gerakan Tanah (2008:3)

Disini akan ditunjukan faktor-faktor utama yang sering menjadi penyebab terjadinya pergerakan tanah. Dapat di lihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Faktor-faktor Utama Penyebab Gerakan Tanah

Faktor Penyebab	Mekanisme Utama
1. Hilangnya penahan lateral	a. Aktifitas erosi b. Pelapukan c. Kemiringan lereng bertambah akibat gerakan d. Pemotongan bagian bawah.
2. Kelebihan beban tanah	a. Air hujan yang meresap pada tanah b. Penimbunan bangunan c. Adanya genangan air di lereng bagian atas.
3. Gerakan	a. Gempa bumi b. Getaran karena ulah manusia/kendaraan.
4. Hilang tahanan bagian bawah	a. Pengikisan oleh air b. Pemotongan lereng bagian bawah c. Erosi d. Penambangan atau pembuatan terowongan.
5. Tekanan lateral	a. Pengisian air dipori-pori antar butir tanah b. Pengembangan tanah.

Sumber : Anugrah. F (2013:8).

2.2.4. Faktor-faktor Penyebab Tanah Longsor

Ada beberapa faktor-faktor yang menyebabkan tanah longsor itu terjadi (ESDM, 2008:3) :

1. Hujan

   Ancaman tanah longsor biasanya dimulai pada bulan November karena meningkatnya intensitas curah hujan. Musim kering yang panjang akan menyebabkan terjadinya penguapan air di permukaan tanah dalam jumlah besar. Hal itu mengakibatkan munculnya pori-pori atau rongga tanah hingga terjadi keretakan dan merekahnya tanah permukaan. Ketikan hujan, air akan menyusup kebagian yang retak sehingga tanah dengan cepat mengembang kembali. Pada awal musim hujan, intensitas hujan yang tinggi biasanya sering terjadi, sehingga kandungan air pada tanah menjadi jenuh dalam

waktu singkat. Hujan lebat pada awal musim dapat menimbulkan longsor karena melalui tanah yang merekah air akan masuk dan terakumulasi di bagian dasar lereng, sehingga menimbulkan gerakan lateral. Bila ada pepohonan di permukaannya, tanah longsor dapat dicegah karena air akan diserap oleh tumbuhan. Akar tumbuhan juga akan berfungsi mengikat tanah.

2. Lereng Terjal

   Lereng atau tebing yang terjal akan memperbesar gaya pendorong. Lereng yang terjal terbentuk karena pengikisan air sungai, mata air, air laut, dan angin. Kebanyakan sudut lereng yang menyebabkan longsor adalah 180^0 apabila ujung lerengnya terjal dan bidang longsornya mendatar.

3. Tanah yang Kurang Padat dan Tebal

   Jenis tanah yang kurang padat adalah tanah lempung atau tanah liat dengan ketebalan lebih dari 2,5 m dan sudut lereng lebih dari 220. Tanah jenis ini memiliki potensi untuk terjadinya tanah longsor terutama bila terjadi hujan. Selain itu tanah ini sangat rentan terhadap pergerakan tanah karena menjadi lembek terkena air dan pecah ketika hawa terlalu panas.

4. Batuan yang Kurang Kuat

   Batuan endapan gunung api dan batuan sedimen berukuran pasir dan campuran antara kerikil, pasir, dan lempung umumnya kurang kuat. Batuan tersebut akanmudah menjadi tanah bila mengalami proses pelapukan dan umumnya rentan terhadap tanah longsor bila terdapat pada lereng yang terjal.

5. Jenis Tata Lahan

   Tanah longsor banyak terjadi di daerah tata lahan persawahan, perladangan, dan adanya genangan air di lereng yang terjal. Pada lahan persawahan akarnya kurang kuat untuk mengikat butir tanah dan membuat tanah menjadi lembek dan jenuh dengan air sehingga mudah terjadi longsor. Sedangkan untuk daerah perladangan penyebabnya adalah karena akar pohonnya tidak dapat menembus bidang longsoran yang dalam dan umumnya terjadi di daerah longsoran lama.

6. Getaran

   Getaran yang terjadi biasanya diakibatkan oleh gempa bumi, ledakan, getaran mesin, dan getaran lalu lintas kendaraan. Akibatnya yang ditimbulkannya adalah tanah, badan jalan, lantai, dan dinding rumah menjadi retak.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

7. Beban Tambahan

   Adanya beban tambahan seperti beban bangunan pada lereng, dan kendaraan akan memperbesar gaya pendorong terjadinya longsor, terutama disekitar tikungan jalan pada daerah lembah. Akibatnya adalah sering terjadinya penurunan tanah dan retakan yang arahnya kearah lembah.

8. Pengikisan / Erosi

   Pengikisan banyak dilakukan oleh air sungai kearah tebing. Selain itu akibat penggundulan hutan di sekitar tikungan sungai, tebing akan menjadi terjal.

9. Material Timbunan pada Tebing

   Untuk mengembangkan dan memperluas lahan permukiman umumnya dilakukan pemotongan tebing dan penimbunan lembah. Tanah timbunan pada lembah tersebut belum terpadatkan sempurna seperti tanah asli yang berada di bawahnya. Sehingga apabila hujan akan terjadi penurunan tanah yang kemudian diikuti dengan retakan tanah.

2.2.5. Hubungan Antara Berat Volume (*Unit Weight*), Angka Pori (*Void Ratio*), Kadar Air (*Moisture Content*), dan Berat Spesifik

Berdasarkan hubungan ini maka dapat dinyatakan dengan menggunakan definisi berat volume dan berat volume kering dalam Persamaan 2.2 dan Persamaan 2.3, sebagai berikut ini :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s.\gamma_w}{1+e} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}2)$$

dengan :

γ_d = berat volume tanah kering

W_s = berat butiran tanah

V = volume total

G_s = berat spesifik butiran padat

γ_w = berat volume air (9,81 kN/m^3)

e = angka pori (*Void Ratio*)

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e).\gamma_w}{1+e} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}3)$$

dengan :

γ_{sat} = berat volume tanah yang jenuh air

G_s = berat spesifik butiran padat

γ_w = berat volume air (9,81 kN/m^3)

e = angka pori (*Void Ratio*)

2.3. Prinsip Kestabilan Lereng

Berdasarkan kajian pada gaya-gaya mekanik yang bekerja pada lereng, gerakan tanah terjadi apabila terjadi gangguan kestabilan pada lereng. Kestabilan pada suatu lereng ditentukan oleh hubungan antara momen gaya yang melongsorkan/meluncurkan (*driving forces*) yang akan membuat masa tanah / batuan bergerak ke bawah, dan momen gaya yang menahan (*resisting forces*) yang menyebabkan massa tanah/batuan tetap berada ditempatnya.

Gaya-gaya yang melongsorkan/meluncurkan (*driving forces*) atau gaya penggerak/puluncur umumnya berupa berat massa material tanah/batuan, beban yang ada pada lereng, tekanan air dalam pori-pori tanah (tekanan hidrostatis akibat naiknya permukaan air dalam lereng), gangguan pada lereng (getaran), sedangkan gaya-gaya yang menahan (*resisting forces*) adalah kuat geser (*shear strength*) tanah atau batuan yang bekerja sepanjang bidang gelincir pada lereng. Besarnya kuat geser suatu massa tanah atau batuan dikontrol oleh kohesi (c) dan sudut gesekan dalam antara partikel-partikel penyusun tanah atau batuan (f). besarnya nilai kohesi tergantung pada kekuatan ikatan antara atom-atom atau molekul-molekul penyusun partikel-partikel batuan/tanah, ataupun tergantung pada kekuatan sementasi antar partikel-partikel batuan/tanah. Sudut gesekan dalam merupakan nilai yang mengekspresikan kekuatan friksi antara partikel-partikel penyusun tanah/batuan.

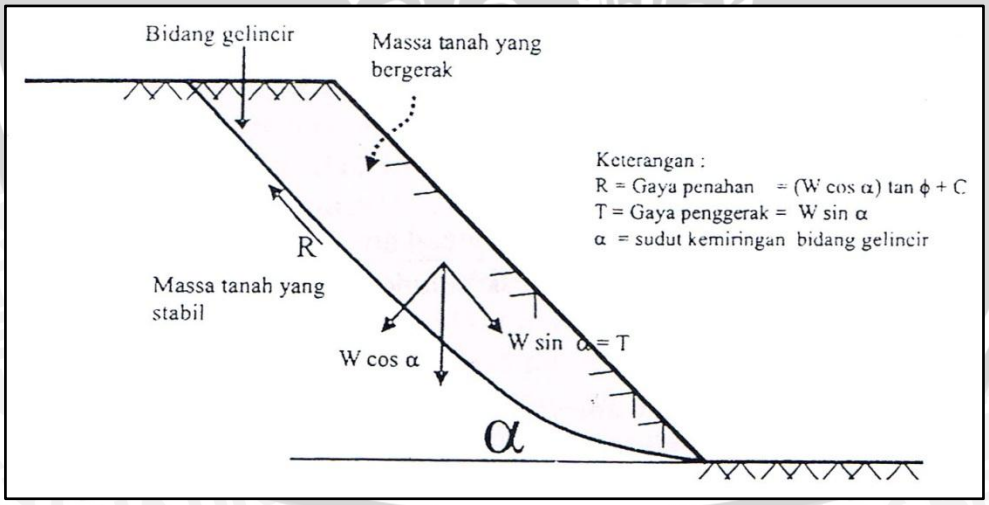
Berdasarkan interaksi antara momen-momen gaya tersebut di atas, kestabilan suatu lereng dapat diperhitungkan dengan cara membandingkan antara gaya yang menahan dan gaya yang melongsorkan/meluncurkan (Gambar 2.9). Perbandingan tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Fs = \frac{\text{Gaya penahan gerakan}}{\text{Gaya penggerak atau peluncur}} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}4)$$

Fs merupakan faktor keamanan lereng (*factor of safety*), yaitu suatu nilai yang mengekspresikan tingkat kestabilan suatu lereng. Lereng tersebut akan tetap stabil jika gaya yang menahan gerakan lebih besar daripada gaya yang melongsorkan atau meluncurkan (Fs > 1). Kondisi kritis pada lereng (kondisi batas kestabilan), terjadi jika gaya yang menahan gerakan massa tanah/batuan sama kuatnya atau seimbang dengan gaya

yang melongsorkan/meluncurkan massa tanah/batuan. Secara matematis dinyatakan Fs = 1. Lereng tersebut akan mulai bergerak dengan tidak stabil jika gaya yang menahan gerakan massa tanah/batuan terlampaui oleh gaya yang melongsorkan/meluncurkan massa tanah tersebut (Fs < 1). Jadi jelaslah bahwa gerakan massa terjadi akibat terganggunya kestabilan lereng, yang secara matematis ditunjukan oleh penurunan nilai Fs dari nilai Fs > 1 menjadi nilai Fs < 1.

Konsep dasar kestabilan lereng ini kemudian dapat dikembangkan untuk analisis secara matematis pada berbagai jenis geometri longsoran, baik dengan bidang gelincir lurus, lengkung atau tidak beraturan. Nash (1987) telah mengevaluasi berbagai metode analisis kestabilan lereng, serta membandingkan kelebihan dan kelemahan tiap-tiap metode tersebut. Metode kestabilan lereng yang dibahas meliputi metode *Fellenius*, modifikasi *Bishop*, metode *Morgenstern and Price*, metode *Spencer* dan *Janbu* dengan penyederhanaan, modifikasi metode *Swedish, Janbu's generalized,* dan metode *Sarma*. Nash (1987) juga menjelaskan bahwa ketepatan dan kelengkapan data input yang digunakan dalam analisis akan memberikan hasil analisis yang lebih akurat, daripada kecanggihan metode yang diterapkan. Penerapan metode analisis secara matematis yang kurang memperhatikan konsep dasar gerakan tanah, terutama menyangkut jenis gerakan dan mekanisme gerakan tanah serta model geometri bidang gelincirnya, akan memberikan hasil analisis yang salah atau tidak realistis.



Gambar 2.9. Gaya-gaya yang Mengontrol Kestabilan Suatu Lereng

Sumber : Karnawati Dwikorita (2005:14)

2.3.1. Stabilitas Talud / Lereng

Suatu permukaan tanah yang miring dengan sudut tertentu terhadap bidang horisontal dan tidak dilindungi, kita namakan sebagai talud tak tertahan *(unrestrained slope).* Talud ini dapat terjadi secara alamiah atau buatan. Bila permukaan tanah tidak datar, maka komponen berat tanah yang sejajar dengan kemiringan talud akan menyebabkan tanah bergerak ke arah bawah seperti ditunjukan dalam Gambar 2.10. Bila komponen berat tanah tersebut cukup besar, kelongsoran talud dapat terjadi, yaitu tanah dapat menggelincir ke bawah. Dengan kata lain, gaya dorong *(driving farce)* melampaui gaya berlawanan yang berasal dari kekuatan geser tanah sepanjang bidang longsor (M. Braja, 1993:165).

Dalam banyak kasus, para insinyur sipil diharapkan mampu membuat perhitungan stabilitas talud guna memeriksa keamanan talud ilmiah, talud galian, dan talud timbunan yang dipadatkan. Faktor yang perlu dilakukan dalam pemeriksaan tersebut adalah menghitung dan membandingkan tegangan geser yang terbentuk sepanjang permukaan retak yang paling mungkin dengan kekuatan geser dari tanah yang bersangkutan. Proses ini dinamakan analisis stabilitas talud *(slope stability analysis).*

Analisis stabilitas suatu talud bukanlah merupakan suatu pekerjaan yang ringan. Bahkan untuk mengevaluasi variabel-variabel seperti lapisan-lapisan tanah dan parameter-parameter kekuatan geser tanah mungkin merupakan pekerjaan yang membosankan. Rembesan dalam talud dan pemilikan kemungkinan bidang longsor/gelincir menambah rumitnya masalah yang akan ditangani.

2.3.2. Angka Keamanan

Tugas para insinyur yang menganalisis stabilitas talud adalah menentukan angka keamanan (M. Braja, 1993:166). Umumnya, angka keamanan didefinisikan sebagai :

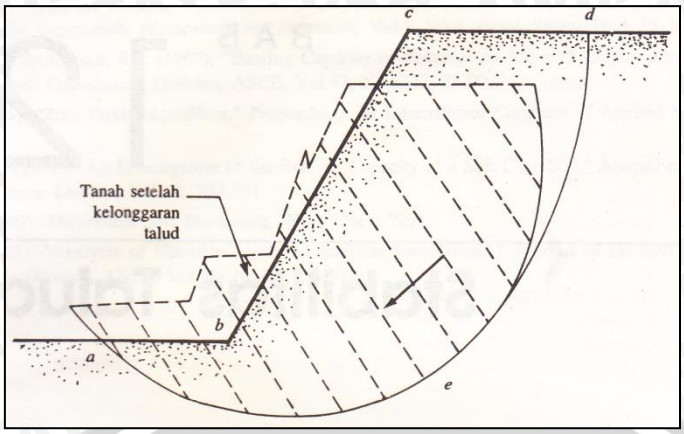
$$Fs = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}5)$$

dengan :

Fs = angka keamanan terhadap kekuatan tanah

τ_f = kekuatan geser rata-rata dari tanah

τ_d = kekuatan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor



Gambar 2.10. Kelongsoran Talud

Sumber : M. Braja (1993:166)

Kekuatan geser tanah terdiri dari dua komponen, yaitu kohesi dan geseran, dan dapat tuliskan sebagai berikut :

$$\tau_f = c + \sigma \tan\phi \quad \text{.....} \quad (2\text{-}6)$$

dengan :

c = kohesi

ϕ = sudut geser tanah

σ = tegangan normal rata-rata pada permukaan bidang longsor

Dengan cara yang sama, kita juga dapat menuliskan :

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan\phi_d \quad \text{.....} \quad (2\text{-}7)$$

dengan c_d adalah kohesi dan ϕ_c sudut geser yang bekerja sepanjang bidang longsor.

Dengan memasukkan Persamaan (2-6) dan (2-7) ke dalam Persamaan (2-8) kita dapatkan :

$$Fs = \frac{c + \sigma \tan\phi}{c_d + \sigma \tan\phi_d} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}8)$$

Sekarang kita dapat memperkenalkan aspek-aspek lain dari angka keamanan tadi, yaitu angka keamanan terhadap kohesi F_c, dan angka keamanan terhadap sudut geser, $F_ø$. Dengan demikian, F_c dan $F_ø$ dapat kita definisikan sebagai :

$$Fs = \frac{c}{c_d} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}9)$$

dan

$$Fs = \frac{\tan\phi}{\tan\phi_d} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}10)$$

Bilamana Persamaan (2-8), (2-9), dan (2-10) dibandingkan, adalah wajar bila F_c menjadi sama dengan $F_ø$ harga tersebut memberikan angka keamanan terhadap kekuatan tanah. Atau, bila :

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

Kita dapat menuliskan :

$$Fs = Fc = F\phi \quad \text{..... (2-11)}$$

F_s = 1, maka talud adalah dalam keadaan akan longsor. Umumnya, harga 1,5 untuk angka keamanan terhadap kekuatan geser dapat diterima untuk merencanakan stabilitas talud.

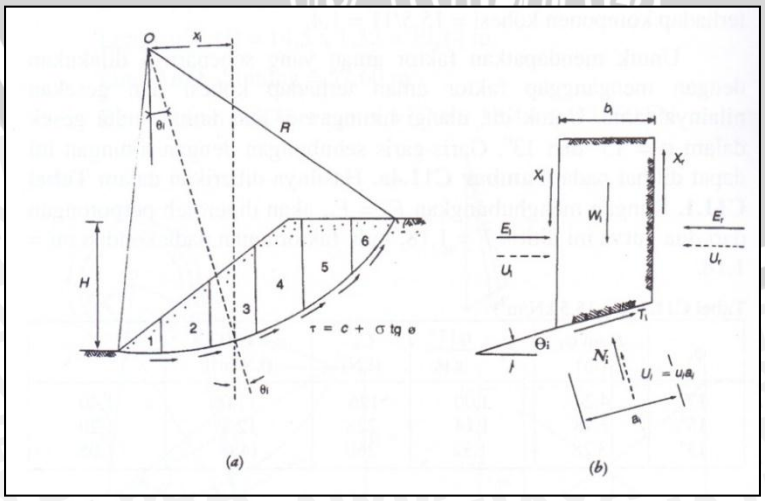
2.3.3. Metode Bishop Disederhanakan (*Simplified Bishop Method*)

Metode Bishop disederhanakan (Bishop, 1955) menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal (Hardiyatmo, 2010:449). Persamaan kuat geser dalam tinjauan tegangan efektif yang dapat dikerahkan tanah, hingga tercapainya kondisi keseimbangan batas dengan memperlihatkan faktor aman, adalah :

$$\tau = \frac{c'}{F} + (\sigma - u)\frac{tg\varphi'}{F} \quad \text{..... (2-12)}$$

dengan σ adalah tegangan normal total pada bidang longsor dan *u* adalah tekanan air pori. Untuk irisan ke-*i*, nilai $T_i = \tau\ a_i$, yaitu gaya geser yang dikerahkan tanah pada bidang longsor untuk keseimbangan batas. Karena itu :

$$T = \frac{c' a_i}{F} + (N_i - u_i a_i)\frac{tg\varphi'}{F} \quad \text{..... (2-13)}$$



Gambar 2.11. Gaya-gaya yang Bekerja pada Irisan

Sumber : Hardiyatmo (2010:444)

Kondisi keseimbangan momen dengan pusat rotasi O antara berat massa tanah yang akan longsor dengan gaya geser total yang dikerahkan tanah pada dasar bidang longsor, dinyatakan oleh persamaan berikut ini :

$$\Sigma W_i\, x_i = \Sigma\, T_i\, R \quad \text{.....} (2\text{-}14)$$

Dengan x_i adalah jarak W_i ke pusat rotasi O. dari Persamaan (2-12) dan (2-14), dapat diperoleh :

$$T = \frac{R\sum_{i=1}^{i=n}\left[c'a_i + \left(N_i - u_i a_i\right) tg\, \varphi'\right]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i\, x_i} \quad \text{.....} (2\text{-}15)$$

Pada kondisi kehilangan vertikal, jika $X_1 = X_i$ dan $X_r = X_{i+1}$:

$$N_i \cos\theta_i + T_i \sin\theta_i = W_i + X_i - X_{i+1}$$

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - T_i \sin\theta_i}{\cos\theta_i} \quad \text{.....} (2\text{-}16)$$

Dengan $N_i' = N_i - u_i a_i$, subtitusi Persamaan (2-15) ke Persamaan (2-16), dapat diperoleh Persamaan :

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - u_i a_i \cos\theta_i - c' a_i \sin\theta_i / F}{\cos\theta_i + \sin\theta_i\, tg\, \varphi' / F} \quad \text{.....} (2\text{-}17)$$

Subtitusi Persamaan (2-18) ke Persamaan (2-16), diperoleh :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}\left(c' a_i + tg\ \varphi' \dfrac{W_i + X_i - X_{i+1} - u_i a_i \cos\theta_i - c' a_i \sin\theta_i / F}{\cos\theta_i + \sin\theta_i\, tg\, \varphi' / F}\right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i\ x_i} \quad \text{.....} (2\text{-}18)$$

Untuk penyederhanaan dianggap $X_i - X_{i+1} = 0$ dan dengan mengambil :

$$x_i = R \sin\theta_i \quad \text{.....} (2\text{-}19)$$

$$b_i = a_i \cos\theta_i \quad \text{.....} (2\text{-}20)$$

Subtitusi Persamaan (2-19) dan (2-20) ke Persamaan (2-18), diperoleh Persamaan faktor aman :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}\left[c' b_i + \left(W_i - u_i b_i\right) tg\, \varphi'\right]\left(\dfrac{1}{\cos\theta_i\left(1 + tg\, \theta_i\, tg\, \varphi' / F\right)}\right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i\ \sin\theta_i} \quad \text{.....} (2\text{-}21)$$

dengan,

F = faktor aman

c' = kohesi tanah efektif (kN/m^2)

φ' = sudut gesek dalam tanah efektif (derajat)

b_i = lebar irisan ke-*i* (m)

W_i = berat irisan tanah ke-*i* (kN)

θ_i = sudut yang didefinisikan dalam Gambar 2.12 (derajat)

u_i = tekanan air pori pada irisan ke-*i* (kN/m^2)

Rasio tekanan pori (*pore preassure ratio*) didefinisikan sebagai :

$$r_u = \frac{ub}{W} = \frac{u}{\gamma h} \quad \text{..... (2-22)}$$

dengan,

r_u = rasio tekanan pori

u = tekanan air pori (kN/m^2)

b = lebar irisan (m)

γ = berat volume tanah (kN/m^2)

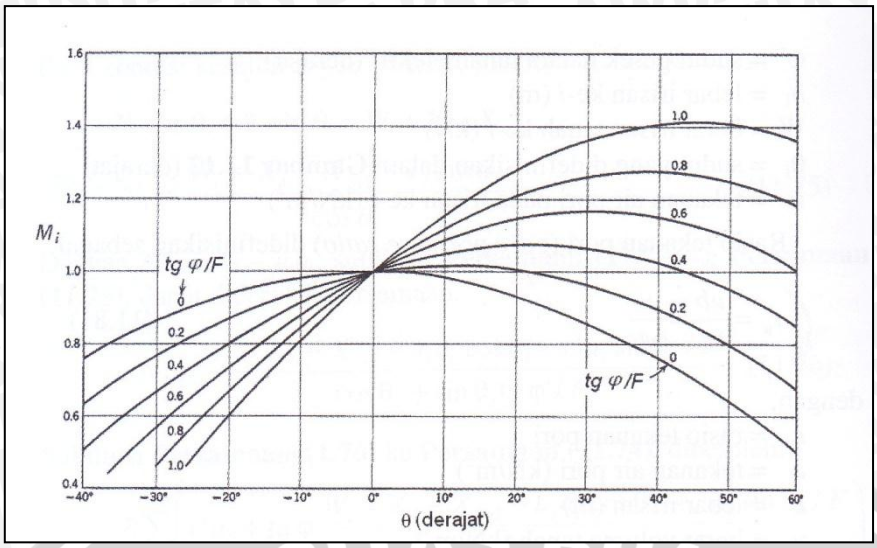
h = tinggi irisan rata-rata (m)

Dari substitusi Persamaan (2-22) ke Persamaan (2-21) bentuk lain dari Persamaan faktor aman untuk analisis stabilitas lereng cara Bishop :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}\left[c'b_i + W_i(1-r_u)tg\,\varphi'\right]\left(\frac{1}{\cos\theta_i\left(1+tg\,\theta_i\,tg\,\varphi'/F\right)}\right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i\,\sin\theta_i} \quad \text{..... (2-23)}$$

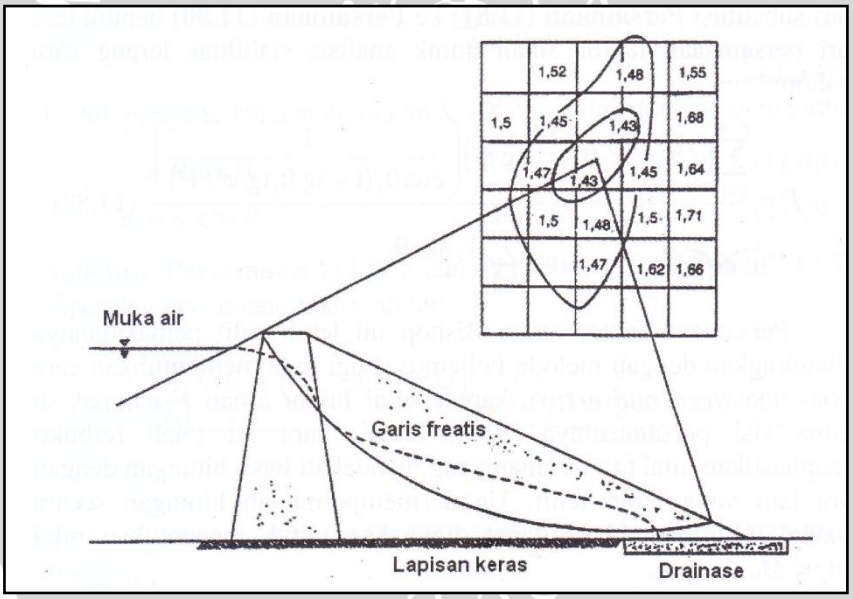
Persamaan faktor aman Bishop ini lebih sulit pemakaiannya dibandingkan dengan metode Fellenius. Lagi pula membutuhkan cara coba-coba (*trial and error*), karena nilai faktor aman F nampak di kedua sisi persamaanya. Akan tetapi, cara ini telah terbukti menghasilkan nilai faktor aman yang mendekati hasil hitungan dengan cara lain yang lebih teliti (Hardiyatmo, 2010:451). Untuk mempermudah hitungan secara manual, Gambar 2.12. dapat digunakan untuk menentukan nilai fungsi *M*i, dengan,

$$M_i(\theta) = \cos\theta_i\left(1+tg\,\theta_i\,tg\,\varphi'/F\right) \quad \text{..... (2-24)}$$



Gambar 2.12. Diagram untuk Menentukan M_i, (Janbu et al., 1956)

Sumber : Hardiyatmo (2010:452)



Gambar 2.13. Contoh Kontur Faktor Aman

Sumber : Hardiyatmo (2010:452)

Lokasi lingkaran longsor kritis dari metode Bishop (1955), biasanya mendekati dengan hasil pengamatan di lapangan. Karena itu, walaupun metode Fellenius lebih mudah, metode Bishop (1955) lebih disukai.

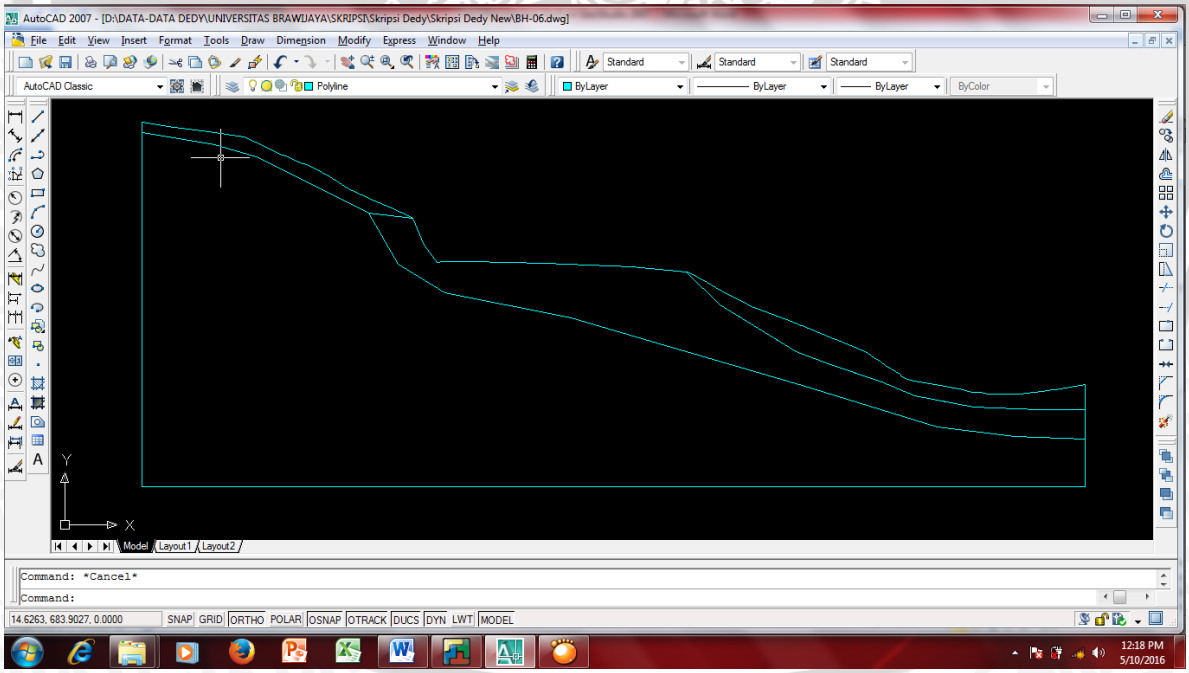
Dalam praktek, diperlukan cara coba-coba dalam menemukan bidang longsor dengan nilai faktor aman yang kecil. Jika bidang longsor dianggap lingkaran, maka lebih baik kalau dibuat kotak-kotak dimana tiap titik potong garis-garisnya merupakan tempat

kedudukan pusat lingkaran longsor. Pada titik-titik potong garis yang merupakan pusat lingkaran longsor, dituliskan nilai faktor aman terkecil pada titik tersebut (Gambar 2.13). Perlu diketahui bahwa pada tiap titik pusat lingkaran harus dilakukan pula hitungan faktor aman untuk menentukan nilai faktor aman terkecil dari bidang longsor dengan pusat lingkaran pada titik tersebut, yaitu dengan cara mengubah jari-jari lingkarannya. Kemudian, setelah faktor aman terkecil pada tiap-tiap titik pada kotaknya diperoleh, digambarkan garis kontur yang menunjukan tempat kedudukan dari titik-titik pusat lingkaran yang mempunyai faktor aman yang sama. Gambar 2.13 menunjukan contoh kontur-kontur faktor aman yang sama. Dari kontur faktor aman tersebut dapat ditentukan letak kira-kira dari pusat lingkaran yang menghasilkan faktor aman terkecil (Hardiyatmo, 2010:453).

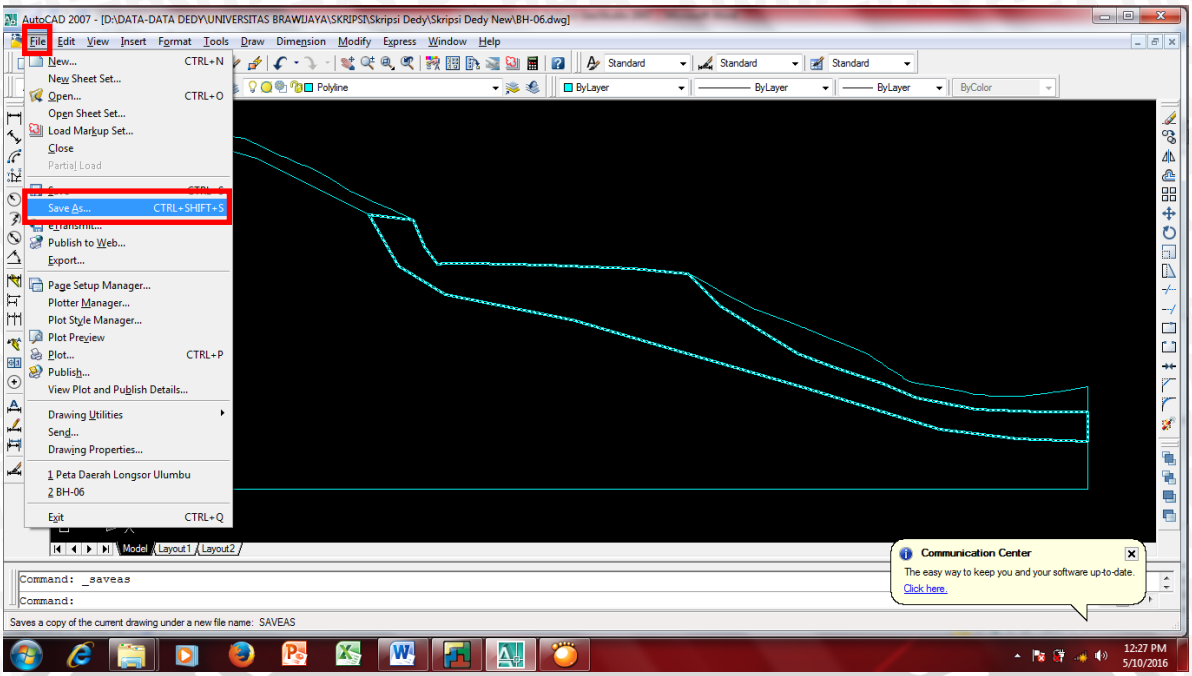
2.4. Analisis Lereng Menggunakan Aplikasi *GeoStudio* 2007

Untuk menganalis lereng menggunakan aplikasi *GeoStudio* 2007, dilakukan dengan tahapan-tahapan pengerjaan sebagai berikut :

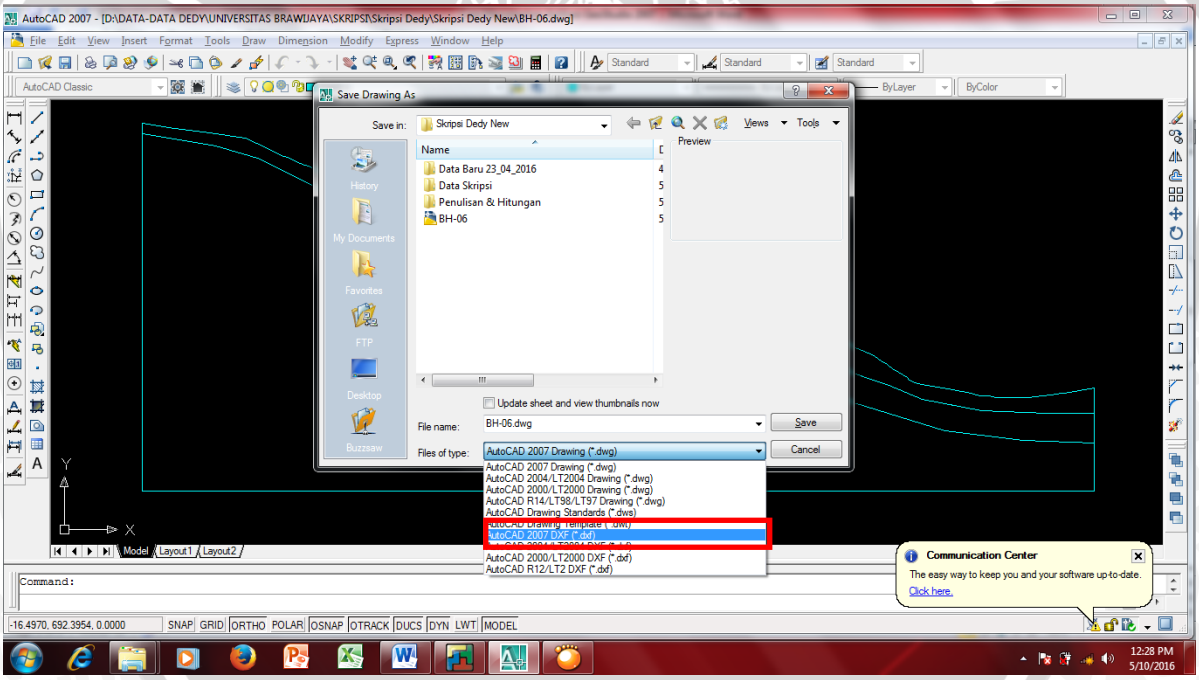
1. Buka *file* gambar potongan lereng pada Aplikasi ***"Autocad"***



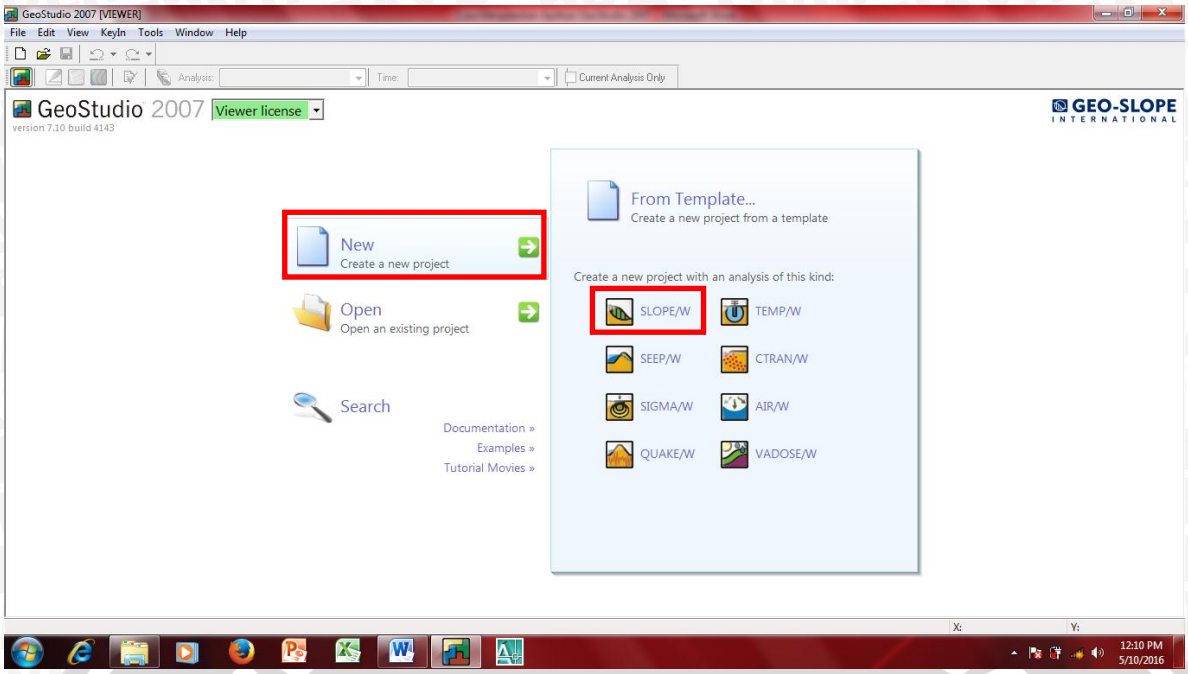
2. Pastikan garis-garis saling terhubung atau garis dalam bentuk format ***"Polyline"*** dan tiap garis *polyline* saling **"tertutup"**.
3. Pilih ***"File"*** kemudian klik ***"Save As"***



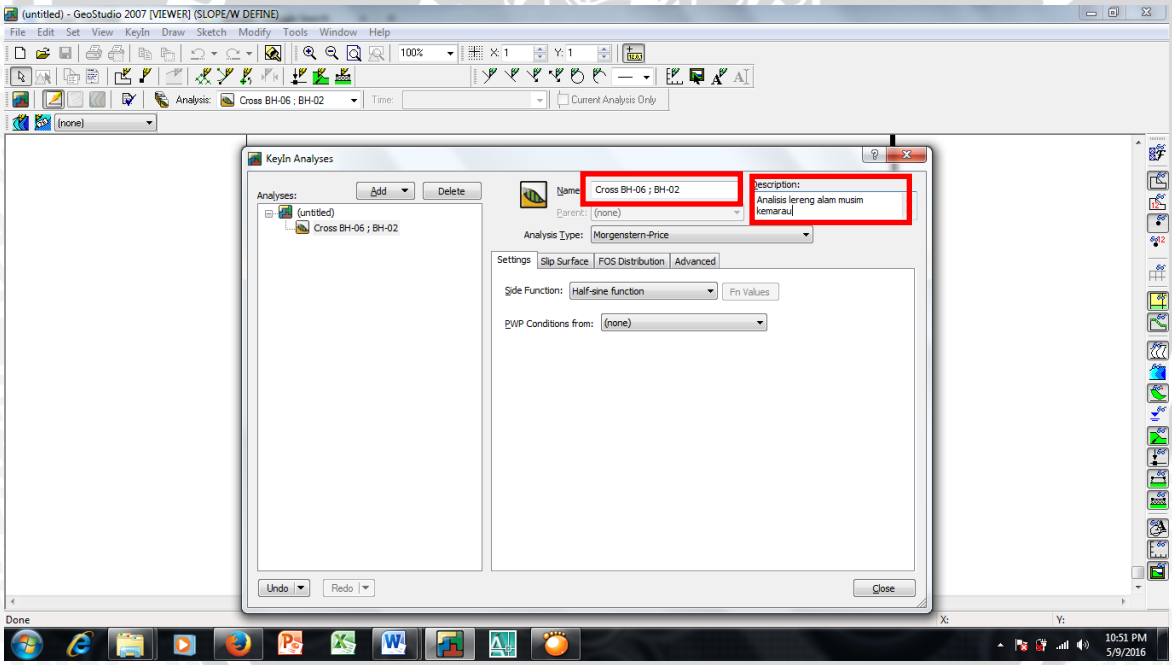
4. Kemudian *save file* dalam Tipe ***"Autocad DXF"***



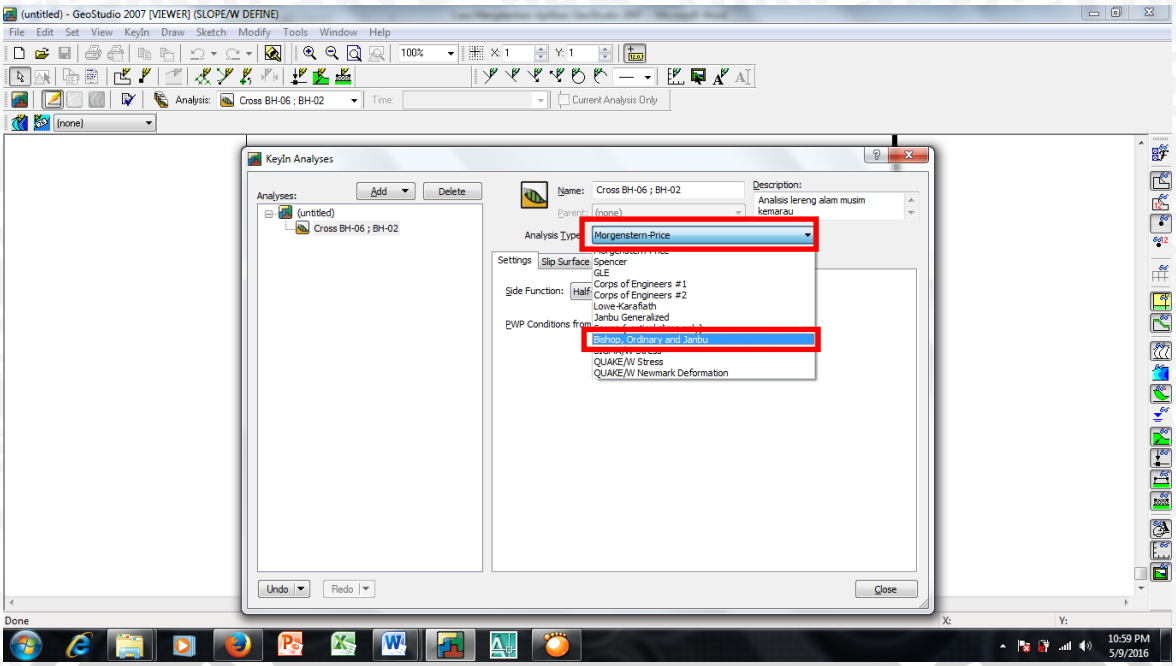
5. Kemudian buka Aplikasi *GeoStudio* 2007
6. Pilih ***"New"*** kemudian klik ***"SLOPE/W"***



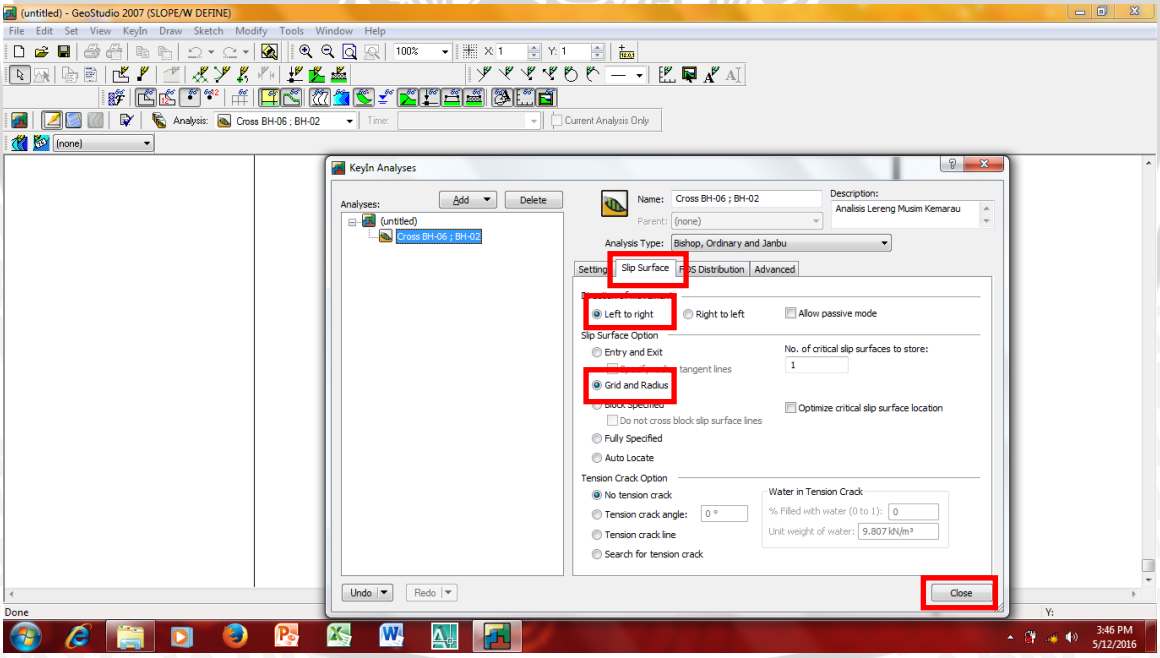
7. Isikan *Name Project* pada kolom ***"Name"*** kemudian isikan juga *Description Project* pada kolom ***"Description"***



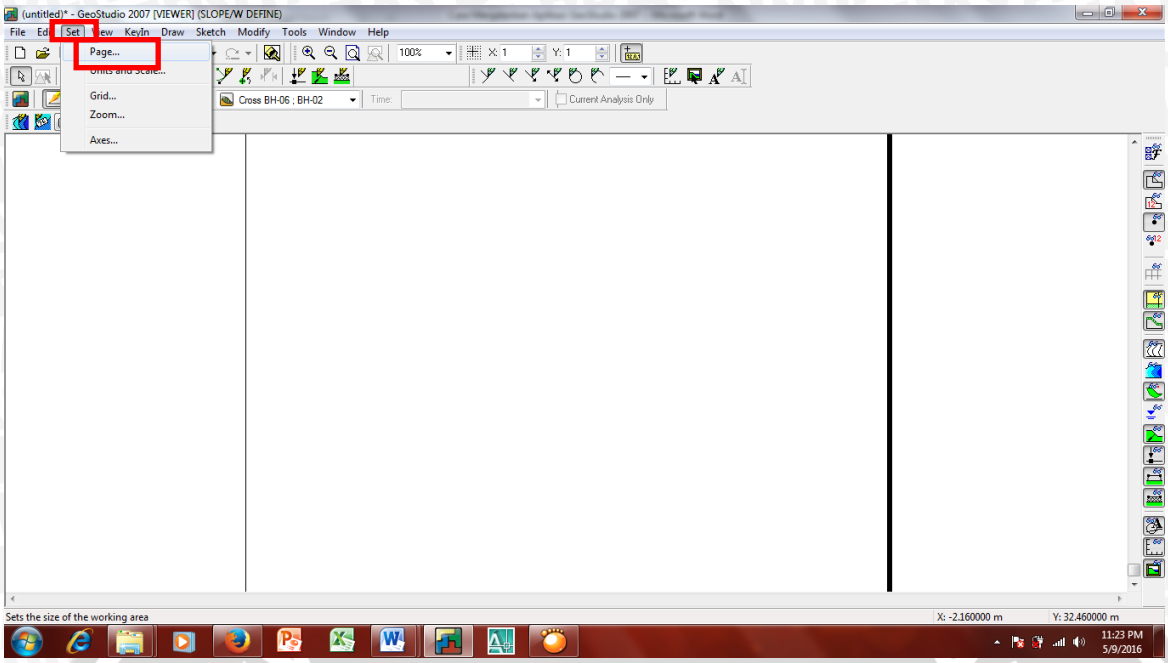
8. Pilih ***"Analysis Type"*** kemudian pilih tipe analisis yang diinginkan, misalnya ; ***"Bishop"***



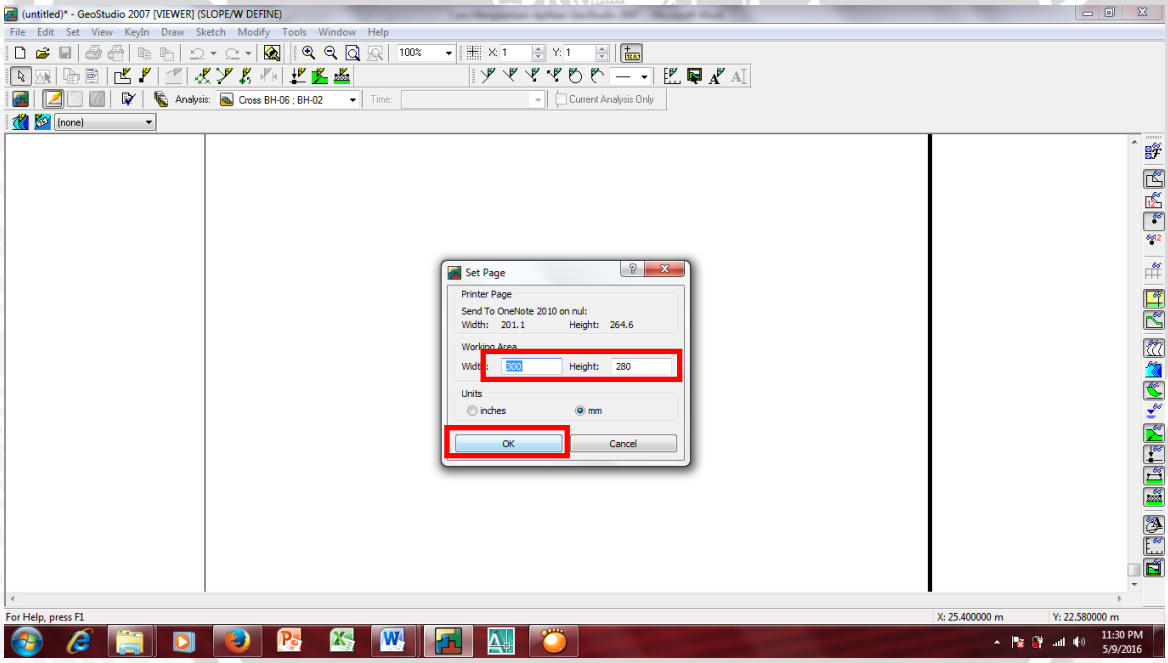
9. Pilih ***"Slip Surface"*** kemudian beri tanda klik pada *Direction of movement* pilih sesuai dengan arah keruntuhan lereng. Misalnya keruntuhan lereng dari arah kiri ke kanan maka dipilih ***"Left to right"***, pada kolom *Slip Surface Options* beri tanda klik pada ***"Grid and Radius"*** setelah itu klik perintah ***"Close"***.



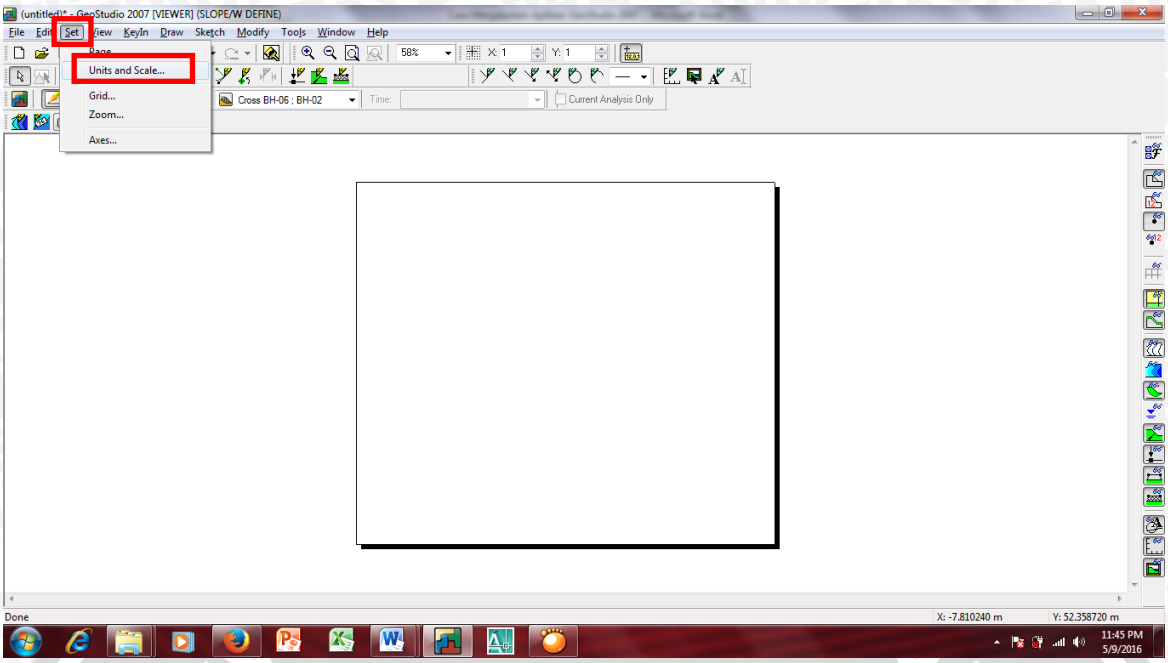
10. Langkah selanjutnya adalah menentukan ukuran kertas sesuai dengan gambar *project* yang diinginkan, dengan cara memilih ***"Set"*** kemudian pilih ***"Page"***



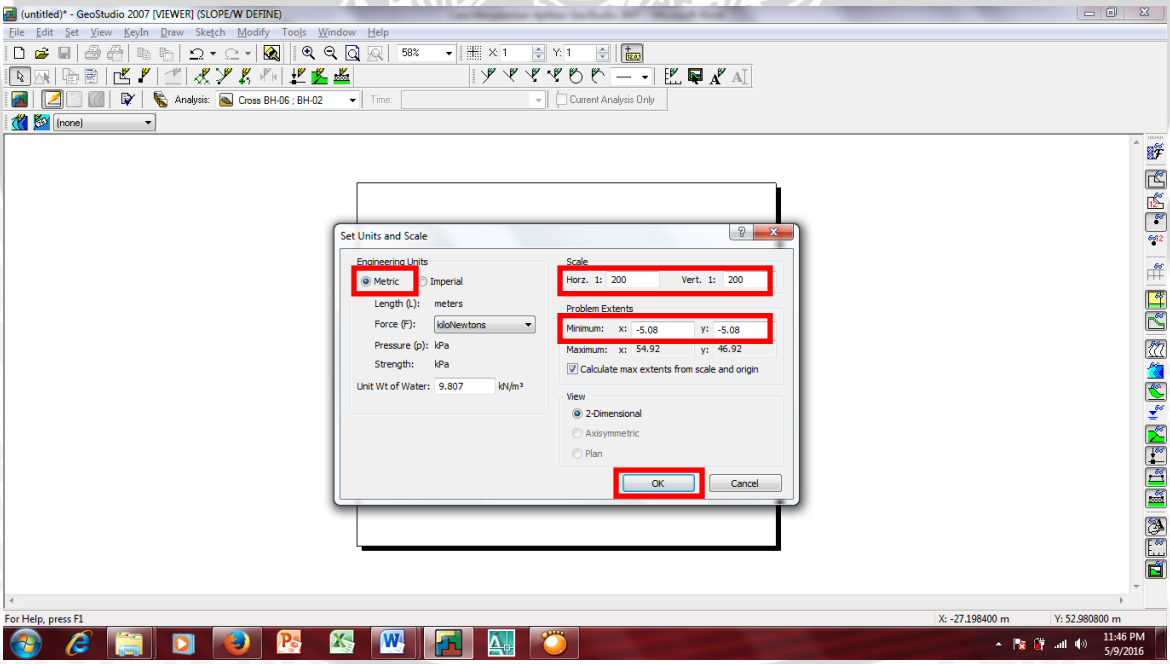
11. Pada kotak dialog *Set Page* masukan ukuran kertas dari lembar *project* tersebut dengan mimilih satuan **"mm"** kemudian klik "***Ok***"



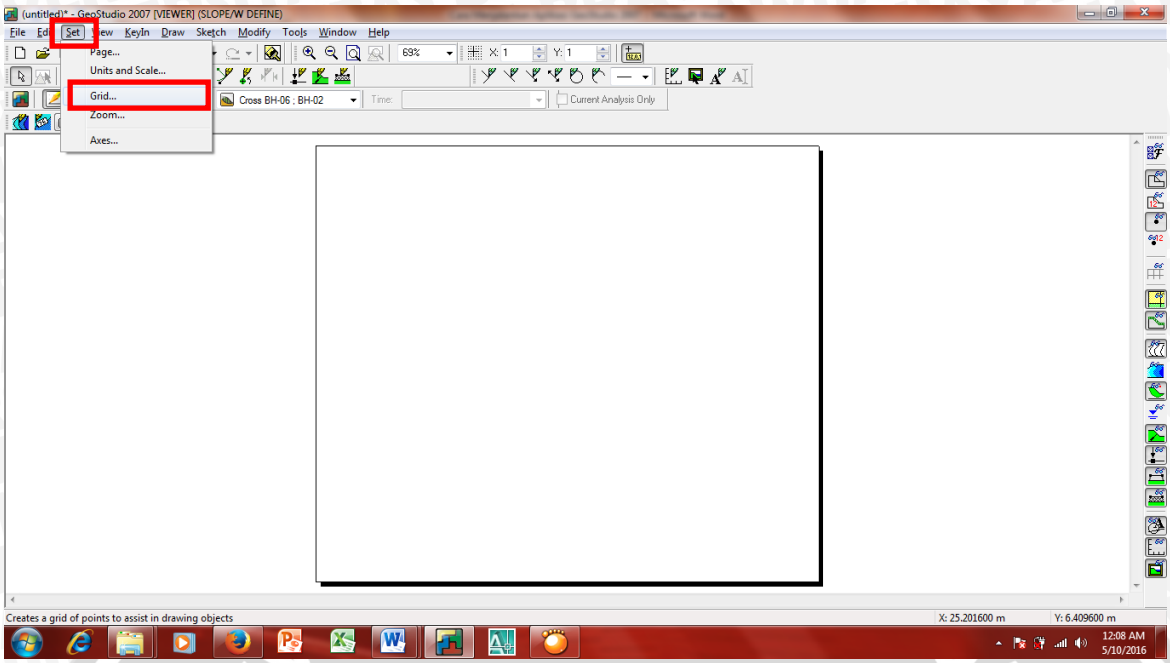
12. Untuk mengatur skala dari gambar *project* tersebut maka pilih ***"Set"*** kemudian klik "***Units and Scale***"



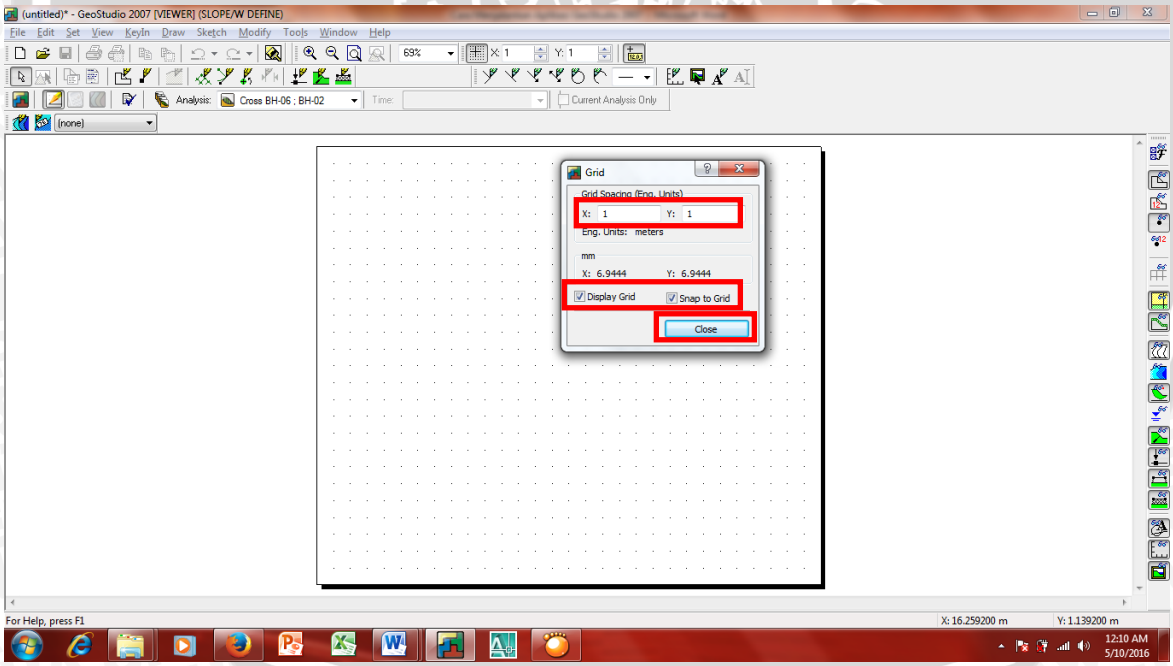
13. Pada kotak dialog *Set Units and Scale* kemudian beri tanda klik pada ***"Metric"*** kemudian isikan skala gambar pada kolom ***"Scale"*** sesuai dengan yang diingikan. Lalu isikan jarak lebar kerja sesuai dengan kordinat pada kolom ***"Problem Extents"***, kemudian klik perintah ***"Ok"***.



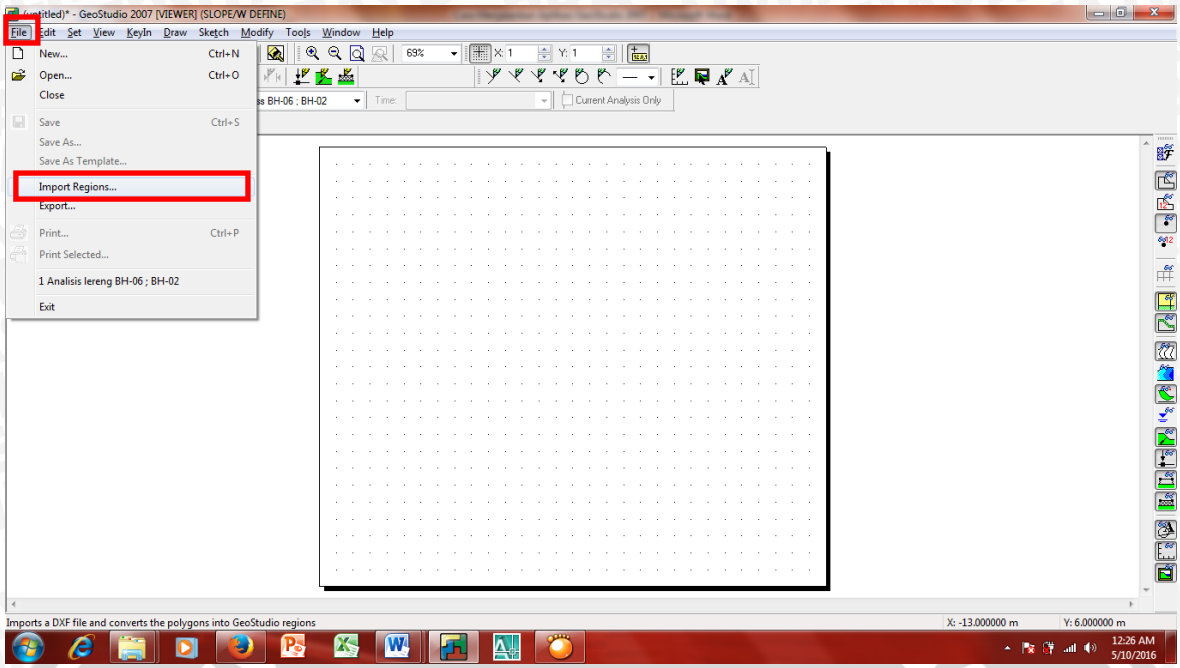
14. Untuk memunculkan *Grid* pada lembar kerja maka pilih ***"Set"*** kemudian klik ***"Grid"***



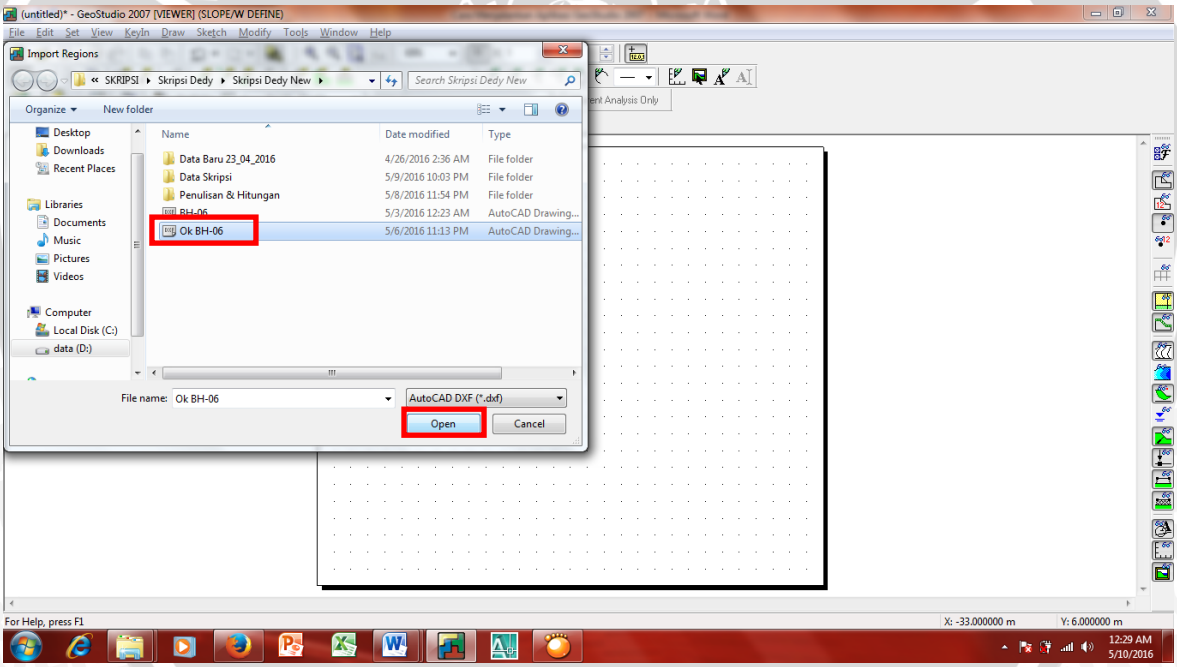
15. Pada kotak dialog *Grid* kemudian isikan angka sesuai yang diingikan pada kolom ***"Grid Spacing"*** kemudian centang ***"Display Grid"*** dan ***"Snap to Grid"*** lalu pilih ***"Close".***



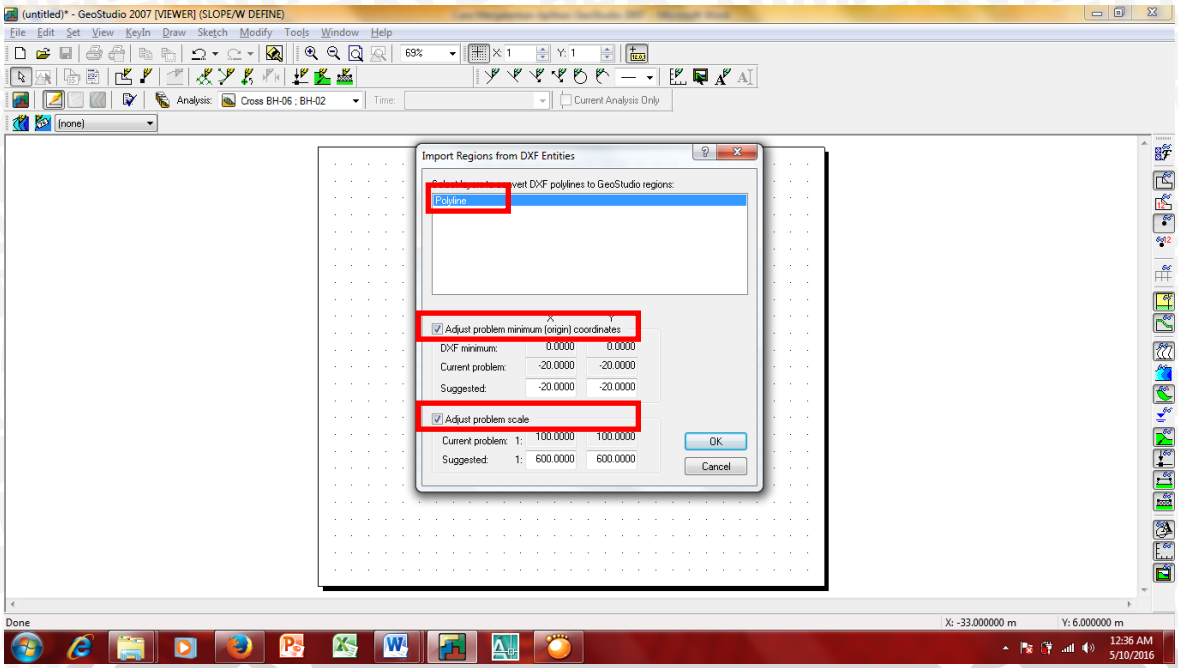
16. Langkah selanjutnya adalah menginport gambar dari *File DXF* ke aplikasi *GeoStudio* 2007 dengan cara pilih ***"File"*** kemudian klik ***"Import Regions"***



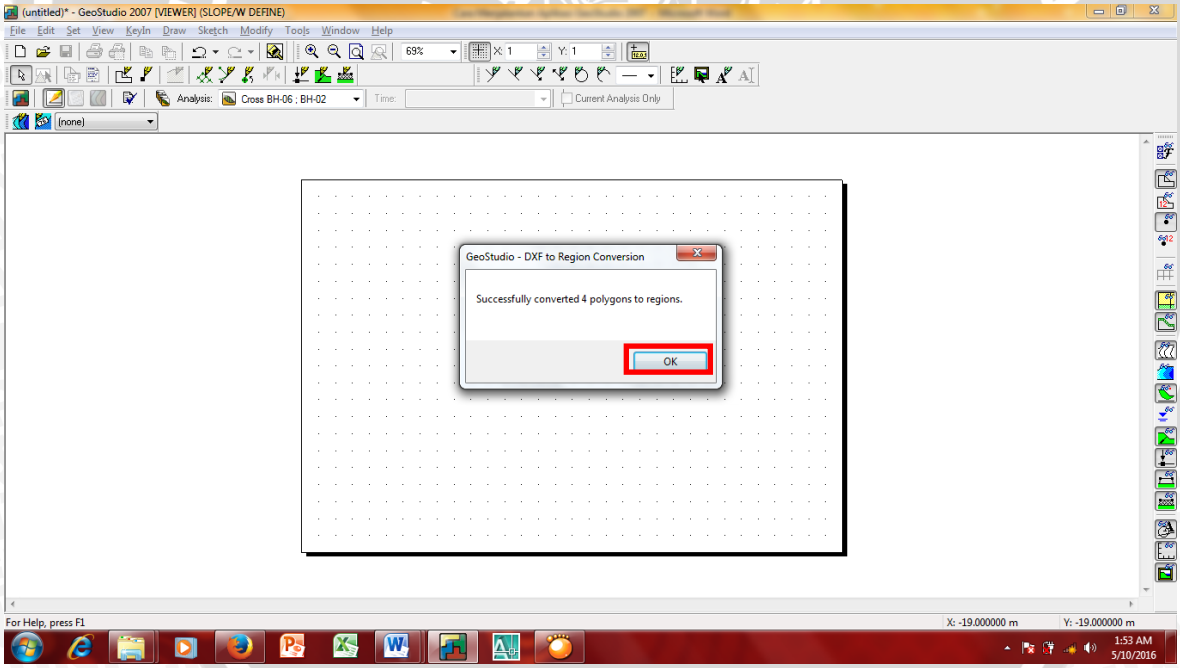
17. Pilih ***"File DXF"*** yang sudah tersimpan kemudian klik ***"Open"***



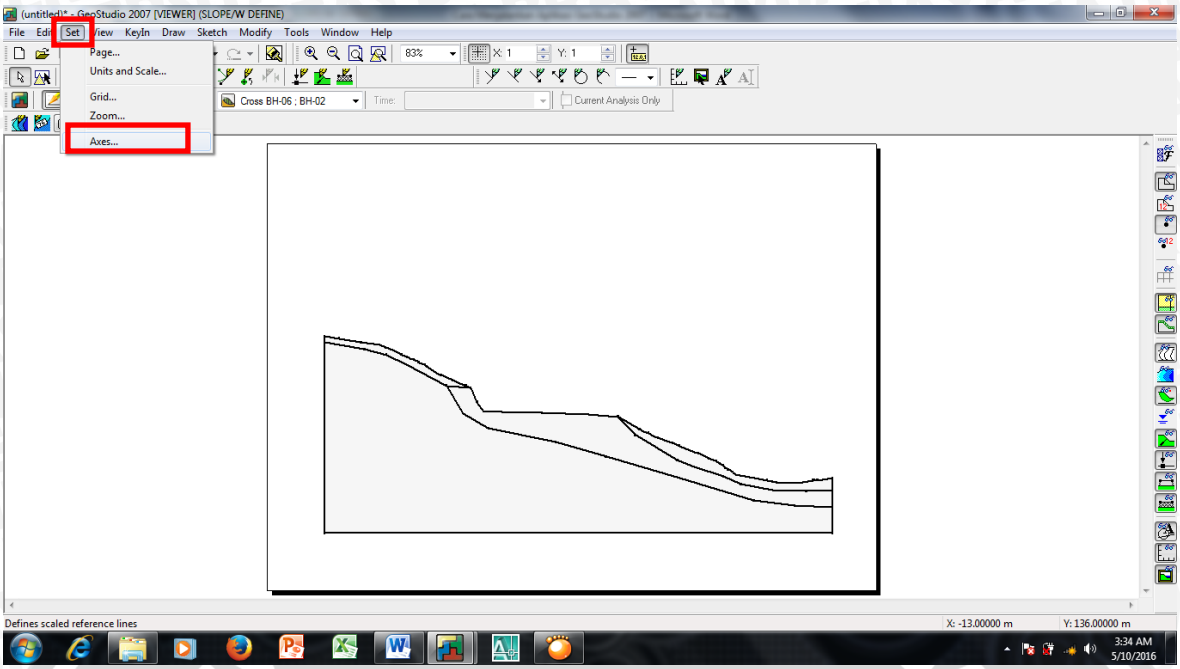
18. Pada kotak dialog *Import Regions from DXF Entities* kemudian *Select* ***"Layer"*** pada kolom kemudian centang pilihan ***"Adjust problem minimum coordinates"*** dan ***"Adjust problem scale"*** kemudian pilih ***"Ok"***



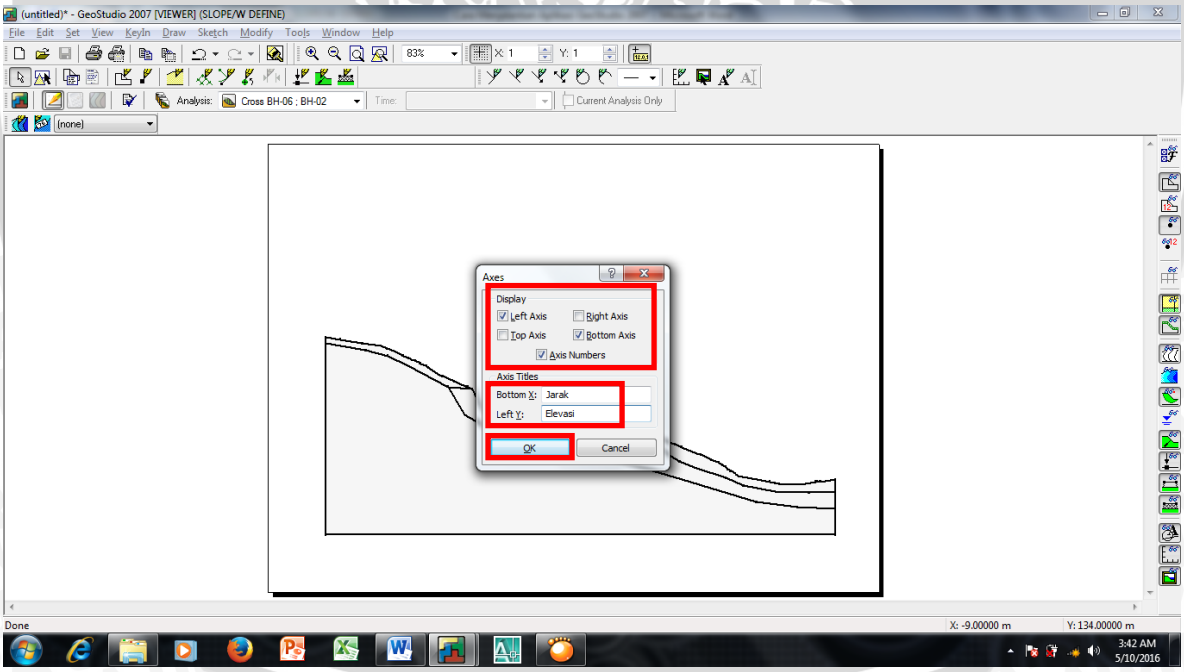
19. Akan muncul kotak dialog *GeoStudio-DXF to Region Conversion*, kemudian pilih ***"Ok"***



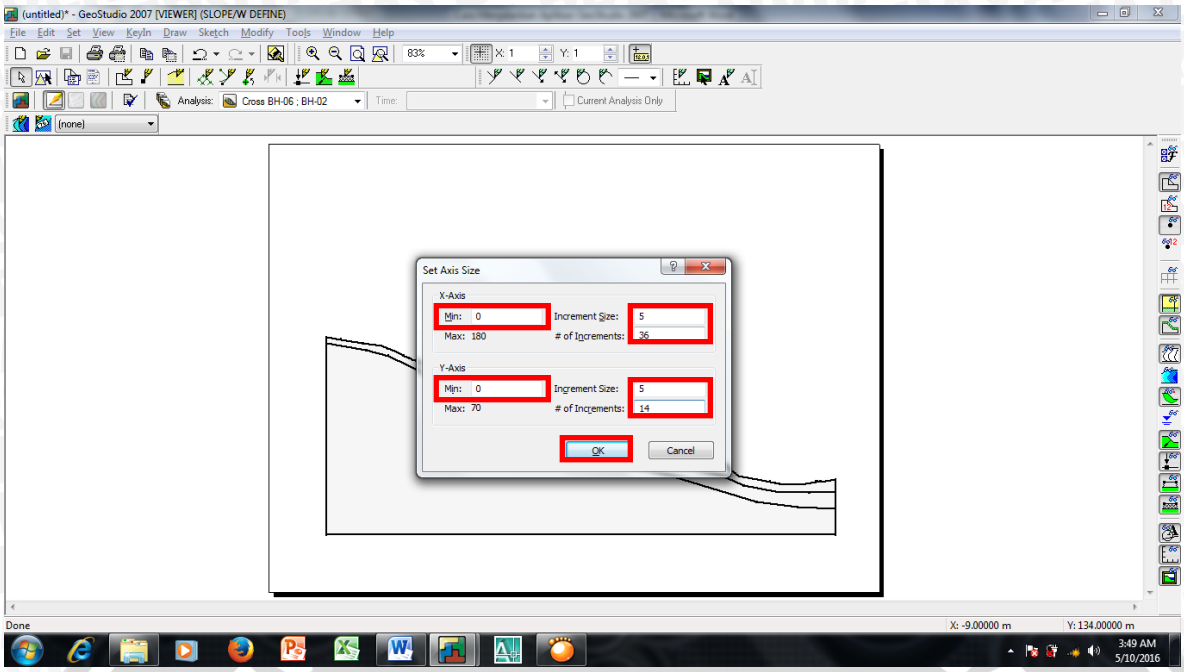
20. Langkah yang selanjutnya adalah memperlihatkan jarak dan elevasi dari lereng tersebut, dengan cara pilih ***"Set"*** kemudian memilih ***"Axes"***



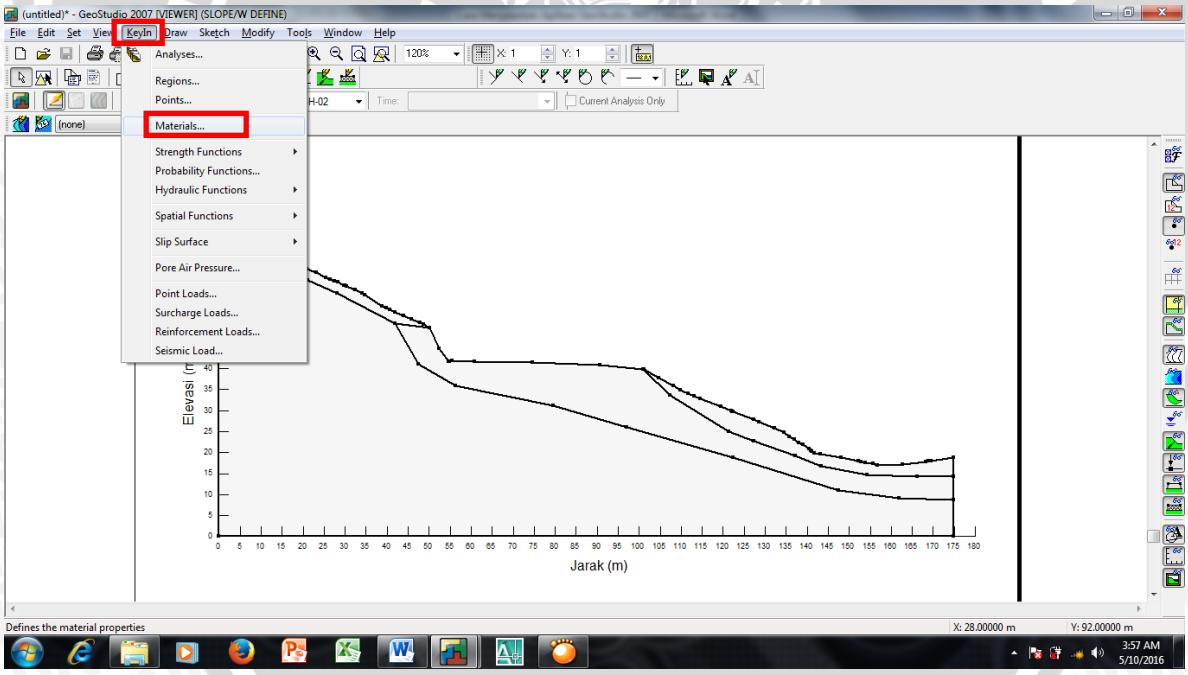
21. Akan muncul kotak dialog *Axes* kemudian pada kolom *Display* dicentang ***"Left Axis"***, ***"Bottom Axis"***, serta ***"Axis Number"***. Selanjutnya pada kolom *Axis Titles* isikan ***"Bottom* X"** sebagai Jarak, dan ***"Left* Y"** sebagai Elevasi, lalu klik perintah ***"Ok"***.



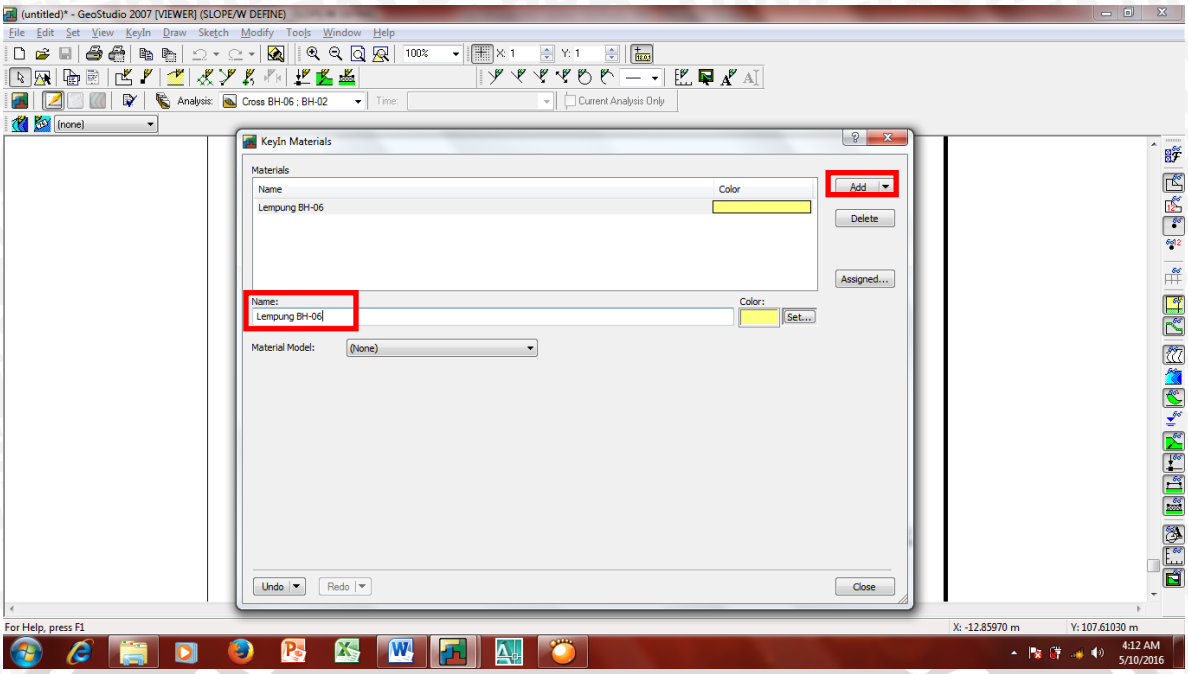
22. Akan muncul kotak dialog *Set Axis Size* isikan pada kolom **"X-*Axis*"** dan **"Y-*Axis*"** sesuai dengan elevasi tertinggi dan jarak tertinggi dari gambar lereng tersebut, kemudian klik perintah ***"Ok"***.



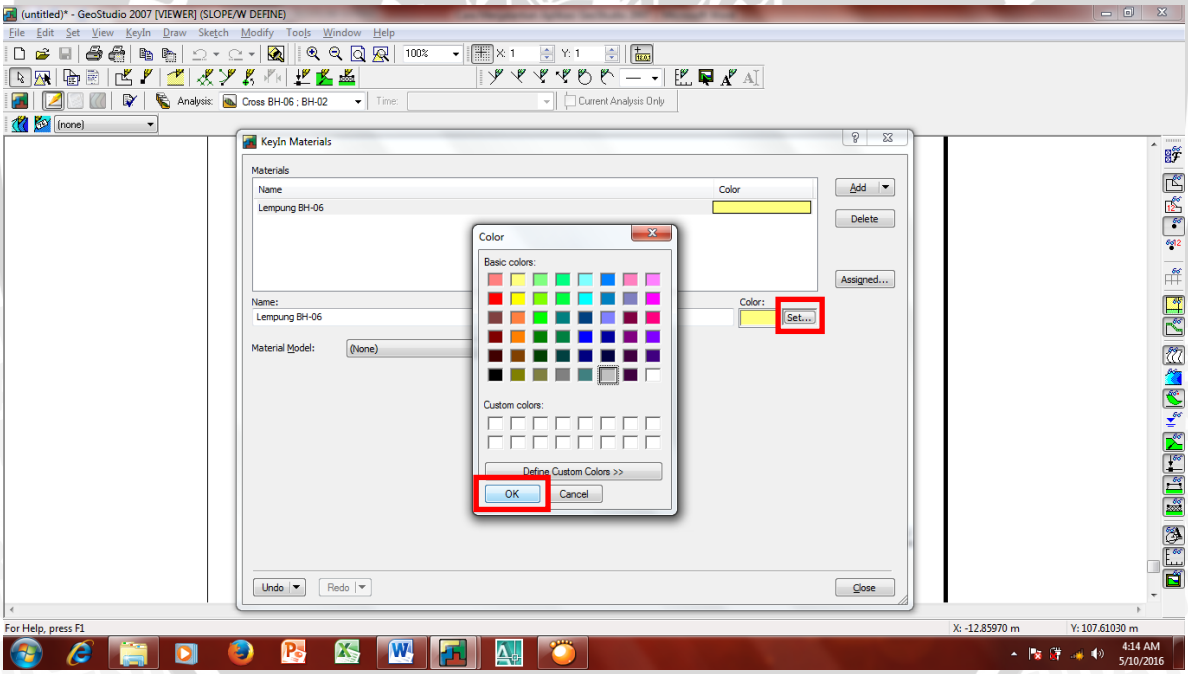
23. Langkah selanjutnya adalah memasukan data parameter tanah dari lereng tersebut, dengan cara memilih ***"KeyIn"*** kemudian pilih "***Materials"***



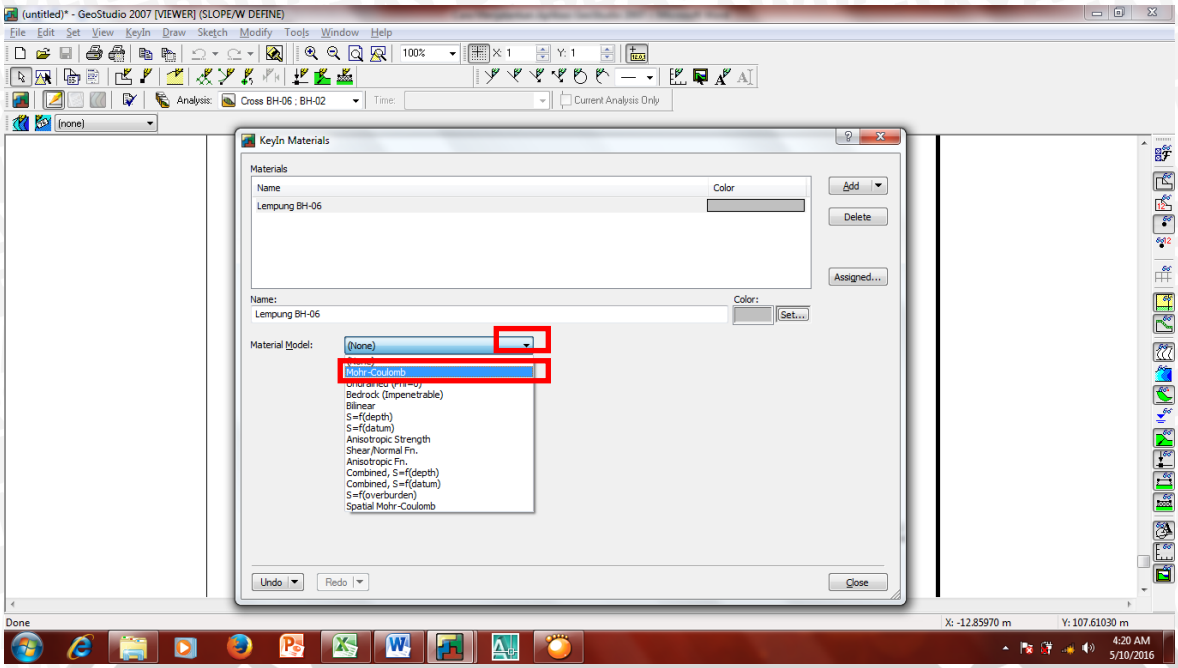
24. Akan muncul kotak dialog *KeyIn Materials*, pilih ***"Add"*** untuk menentukan material serta menambah material tanah pada lereng tersebut. Kemudian nama material tanah pada kolom ***"Name"***.



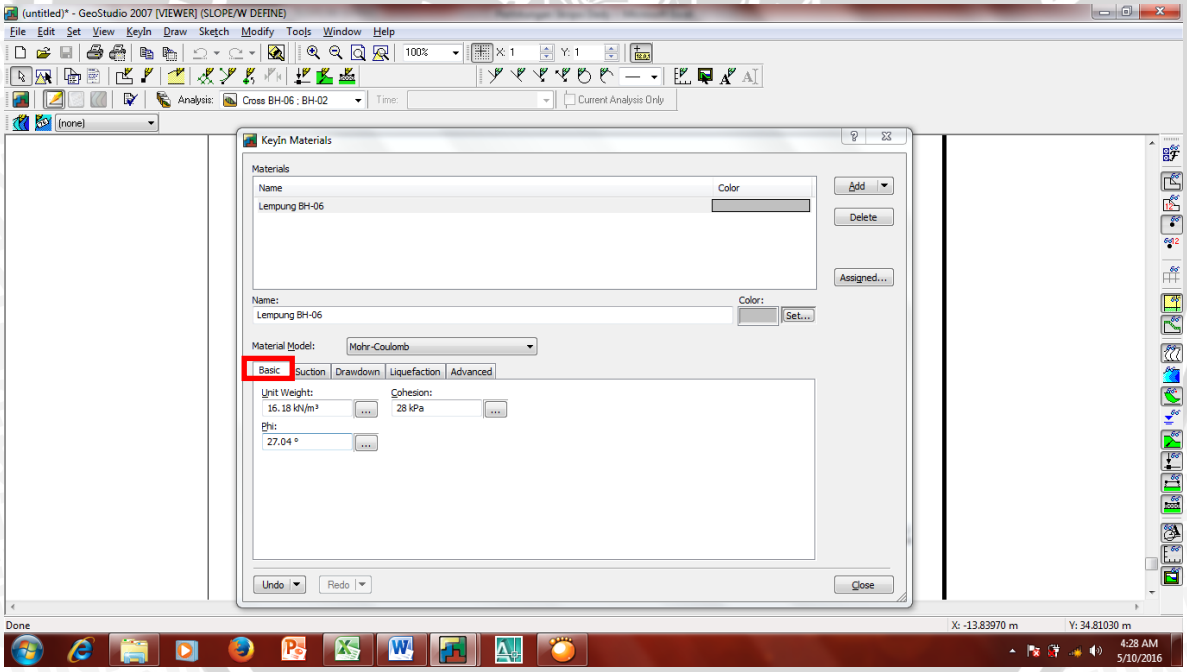
25. Selanjutnya menentukan warna dari material tanah dengan mengklik ***"Set"*** tentukan warna sesuai dengan yang diinginkan, kemudian klik perintah ***"Ok".***



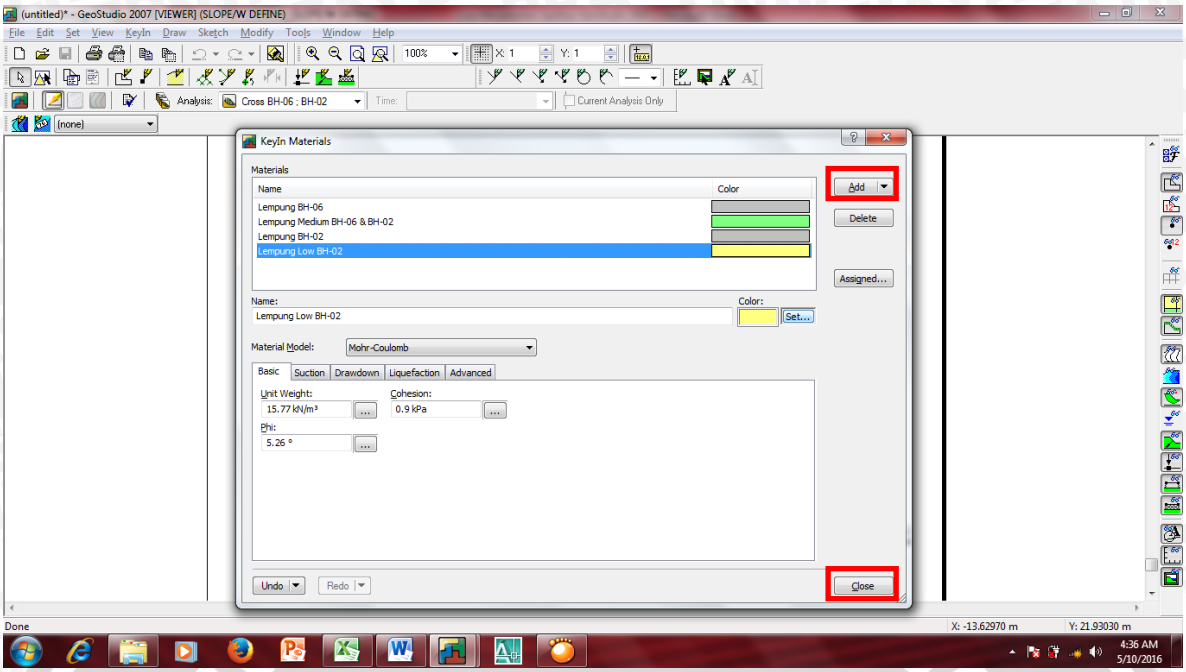
26. Langkah selanjutnya adalah memasukan parameter tanah yaitu : Berat volume tanah (γ_{sat}), kohesi tanah (c), dan sudut geser tanah (θ). Caranya dengan mengklik kolom *Material Model* kemudian pilih ***"Mohr-Coulomb"***



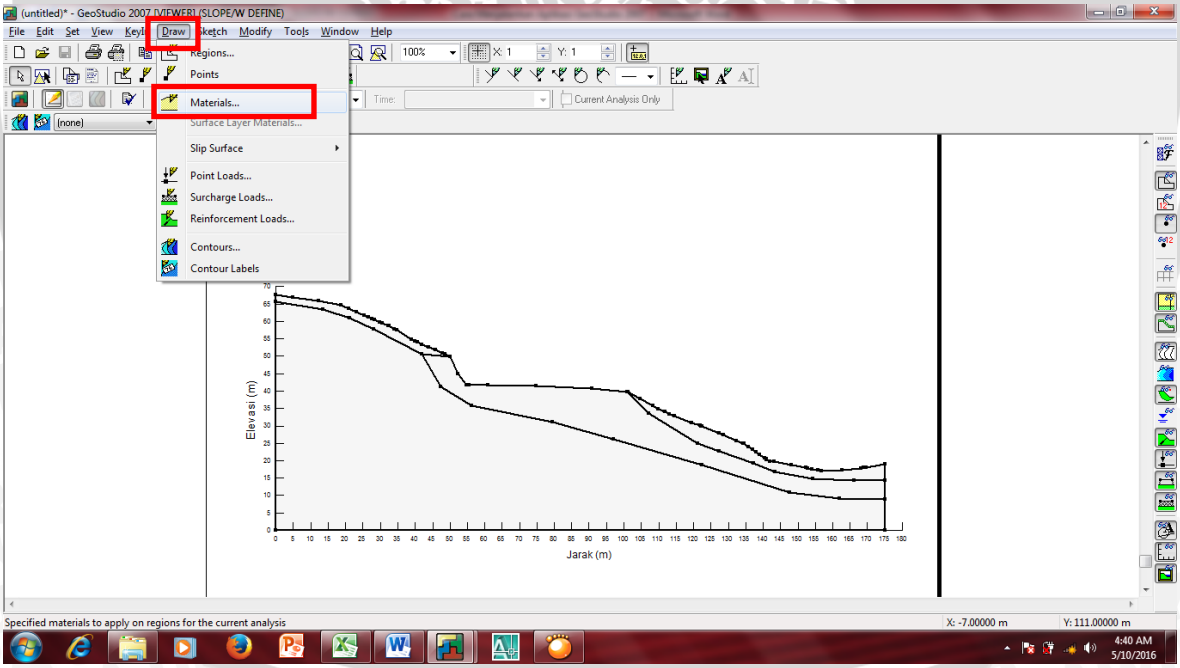
27. Pilih ***"Basic"*** kemudian nilai parameter tanah sudah bisa diisikan pada kolomnya masing-masing.



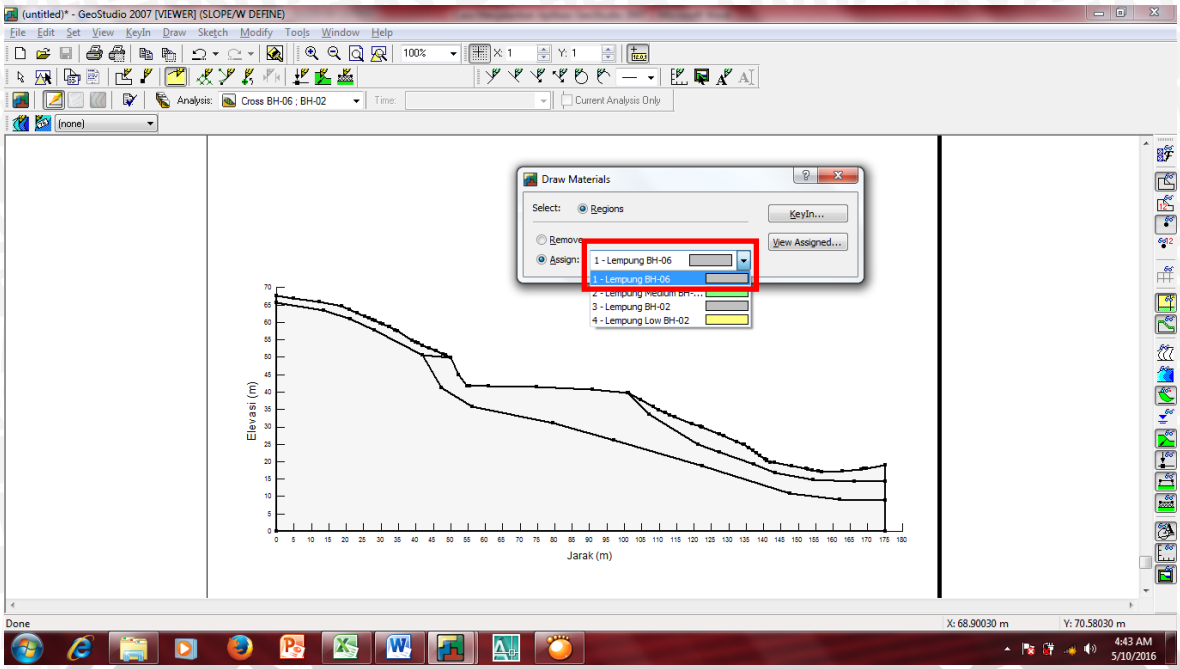
28. Selanjutnya pilih ***"Add"*** untuk menentukan jenis material tanah yang berikutnya. Lakukan langkah 24 sampai langkah 27, sehingga semua jenis material tanah sudah terisi pada lereng tersebut. Kemudian pilih perintah ***"Close"***.



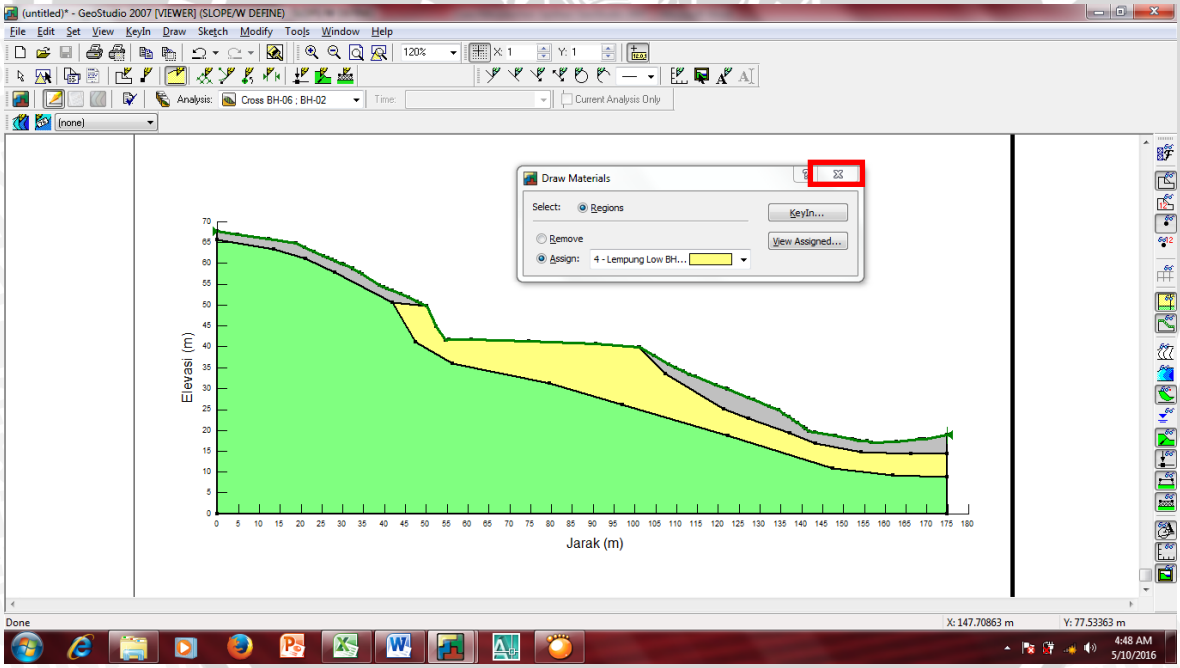
29. Langkah selanjutnya adalah menghubungkan data parameter jenis material tanah dengan gambar lereng tersebut. Caranya adalah dengan memilih ***"Draw"*** kemudian pilih ***"Materials"***



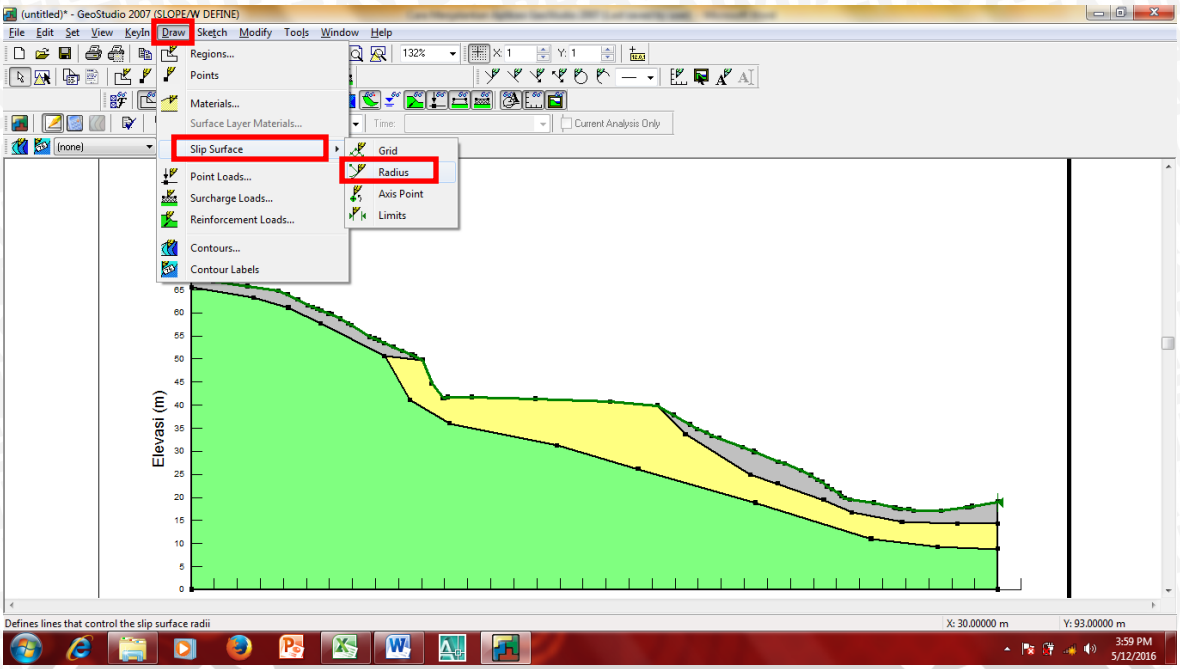
30. Akan muncul kotak dialog *Draw Materials*, kemudian klik kolom ***"Assign"*** untuk memilih jenis material tanah dan kemudian *Select* pada gambar lereng tersebut.



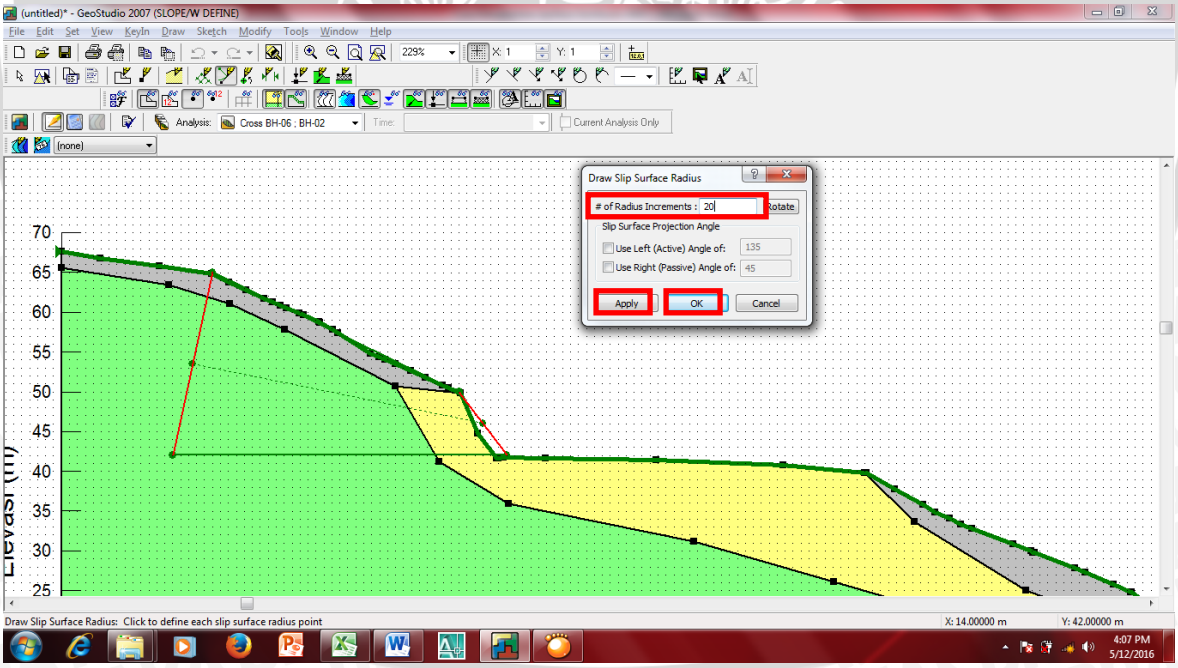
31. Lakukan langkah 30 sampai semua jenis material tanah dihubungkan pada lereng tersebut, kemudian pilih perintah ***"Close"***.



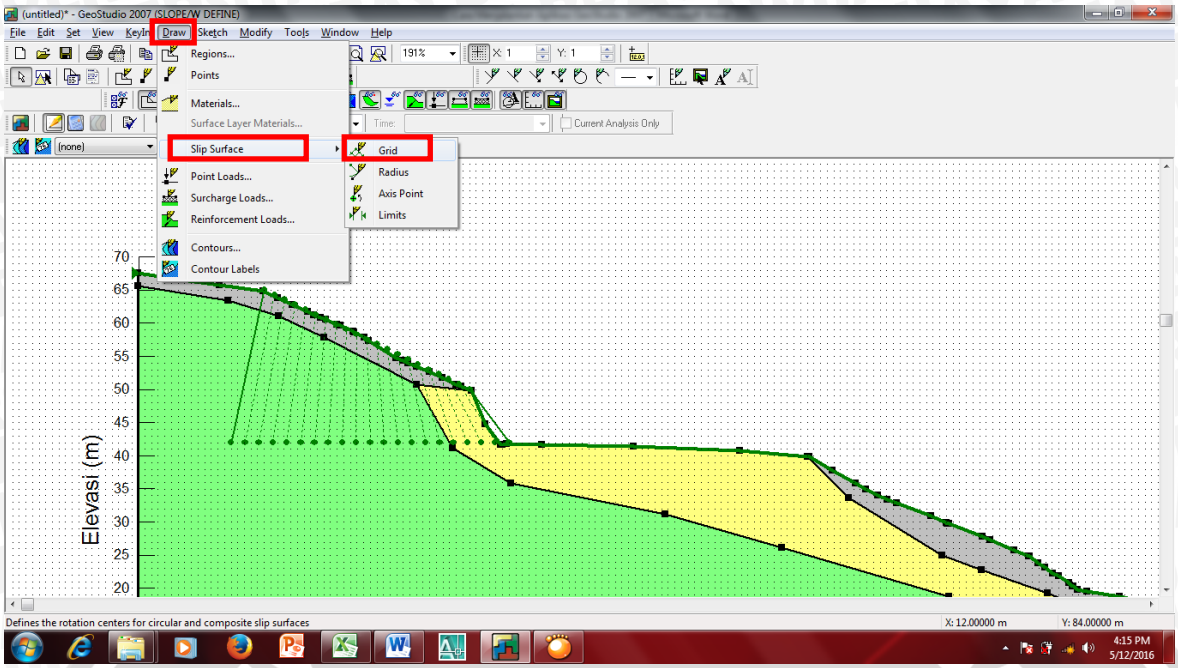
32. Langkah selanjutnya adalah pilih ***"Draw"*** kemudian pilih ***"Slip Surface"*** pilih lagi ***"Radius"*** untuk menggambarkan radius dari kelongsoran lereng tersebut.



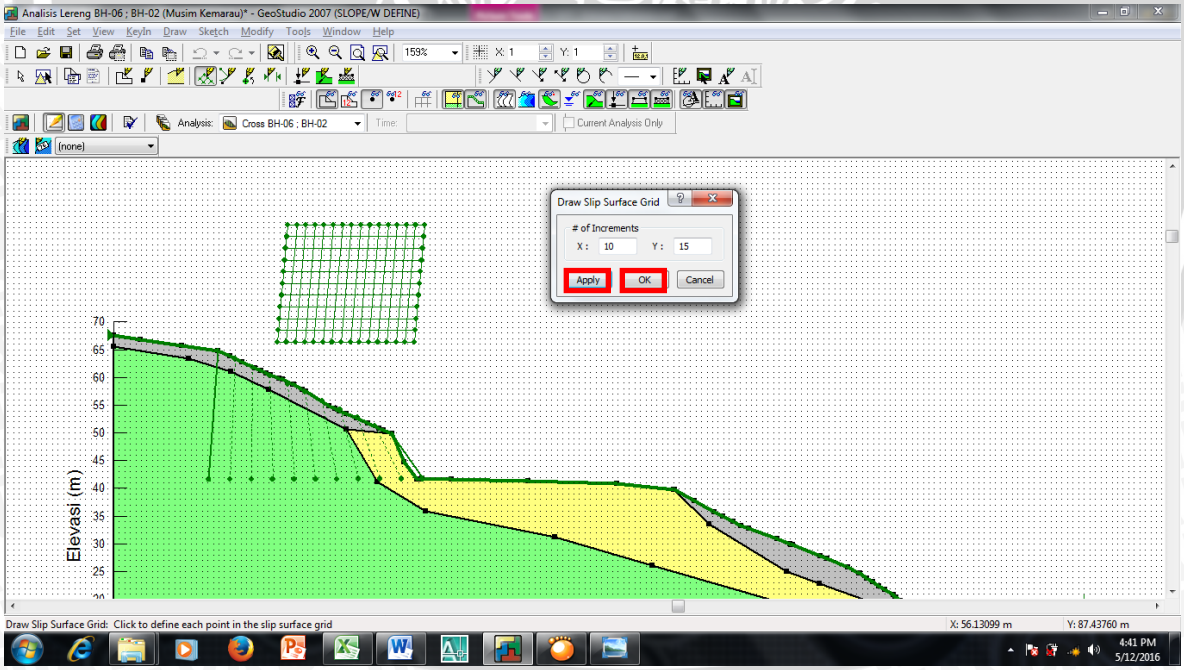
33. Gambarkan radius kelongsoran pada gambar *cross* lereng BH-06 ; BH-02 tersebut. Kemudian muncul kotak dialog *Draw Slip Surfece Radius* maka pada kolom ***"# of Radius Increments"*** isikan intervalnya irisan pada radius lereng tersebut. Lalu klik ***"Apply"*** dan klik juga perintah ***"Ok"***.



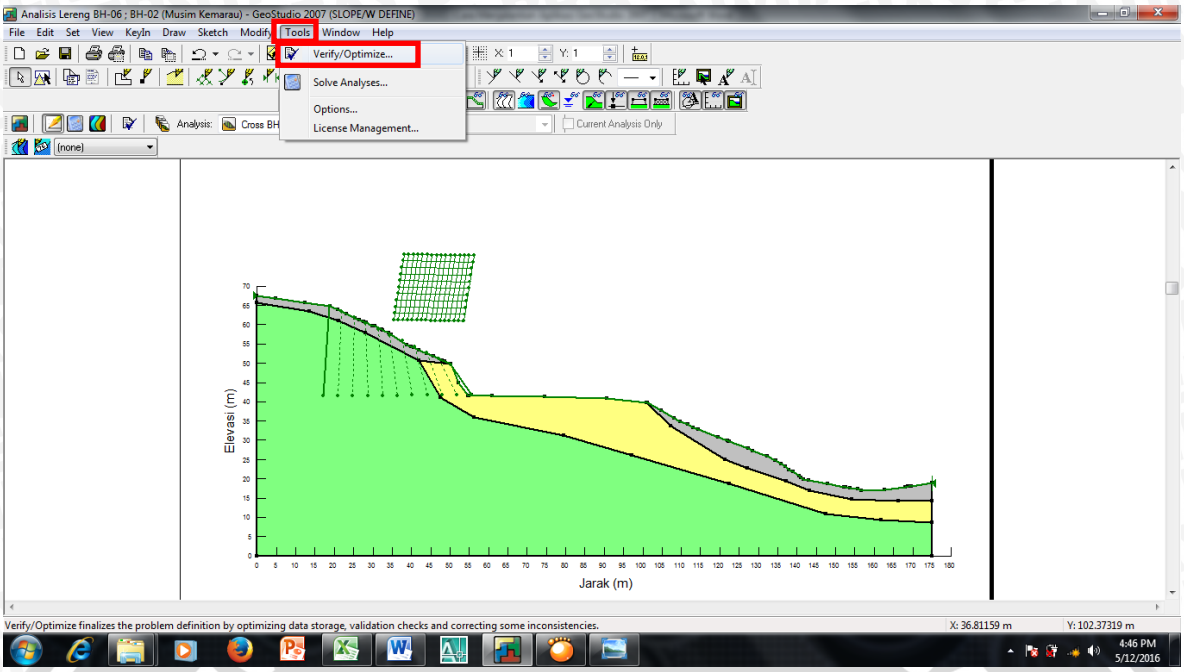
34. Langkah selanjutnya adalah menggambar grid untuk menentukan titik pusan dari radius kelongsoran tersebut dengan memilih ***"Draw"*** kemudian pilih ***"Slip Surface"*** pilih lagi ***"Grid"***.



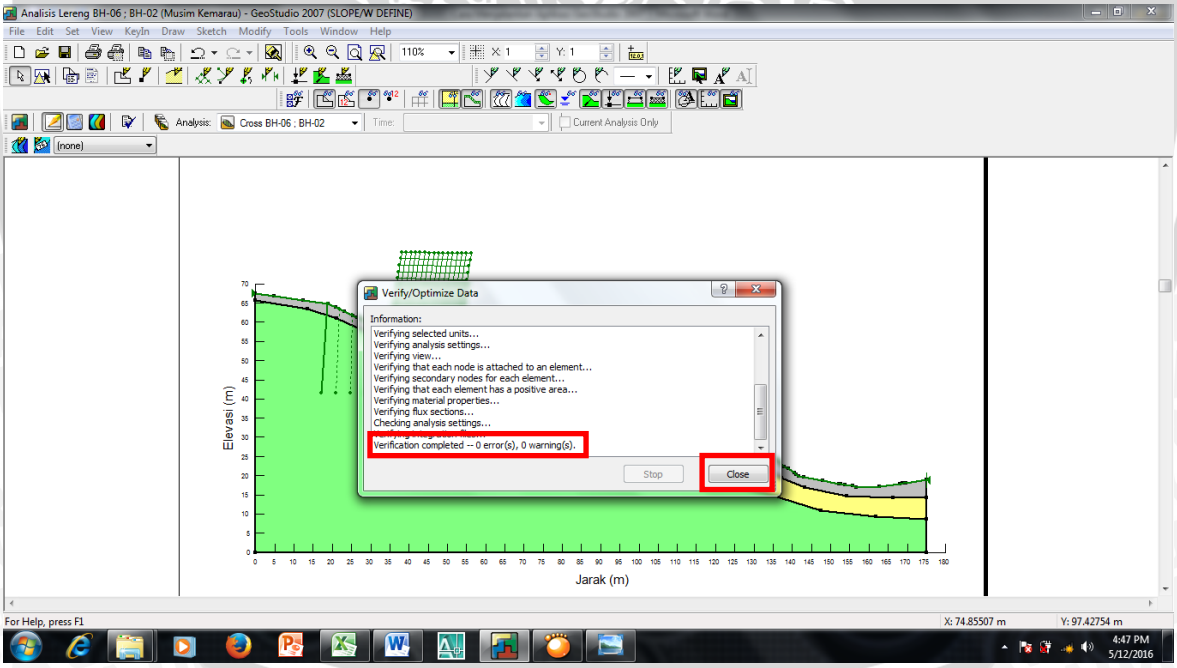
35. Gambarkan pada bagian atas lereng dengan bentuk persegi panjang sehingga radius dari lereng tersebut dapat terlihat. Akan muncul kotak dialog *Draw Slip Surface Grid* maka pada kolom ***"# of Increments"*** isikan interval dari grid X dan interval dari grid Y. Kemudian klik ***"Apply"*** dan klik juga perintah ***"Ok"***



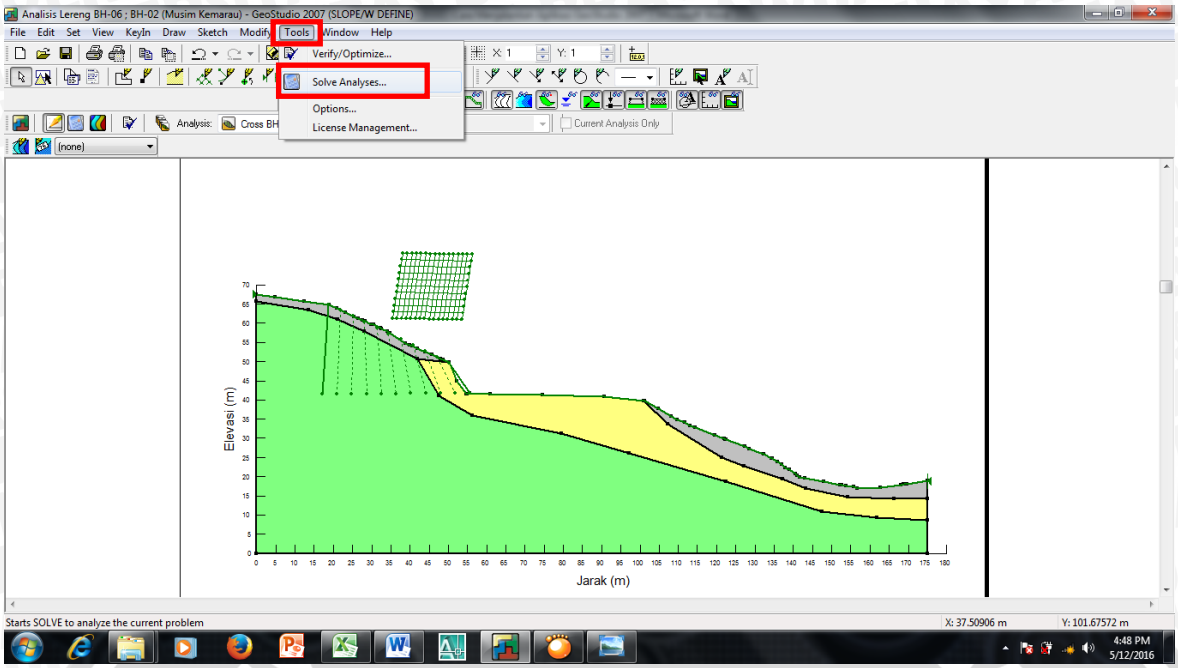
36. Langkah yang selanjutnya adalah mengecek analisis data tersebut, dengan cara pilih ***"Tools"*** kemudian pilih ***"Verify/Optimize"***



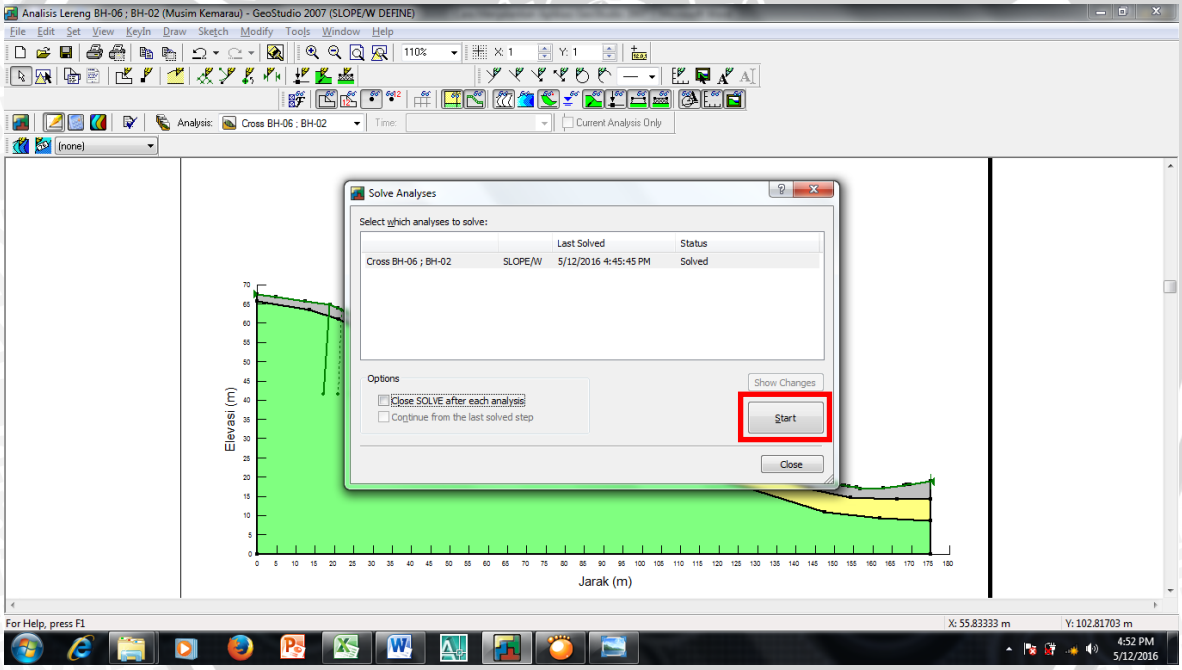
37. Pada kotak dialog *Verify/Optimize Data*, perlu dicek apakah analisis datanya sudah benar atau belum. Jika datanya sudah benar maka ditulis ***"Verification Completed – 0 eror(s), 0 Warning(s)"***. Kemudian pilih perintah ***"Close"***



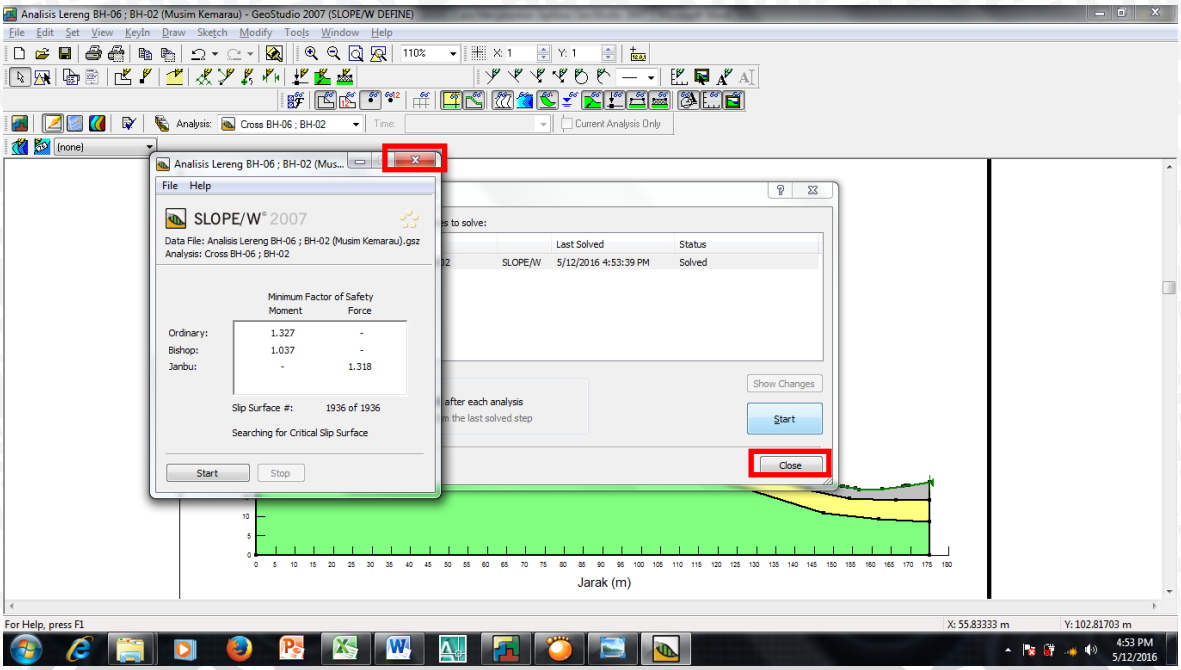
38. Langkah yang selanjutnya adalah menganalisis nilai faktor keamanan dari lereng tersebut. Dengan cara memilih ***"Tools"*** kemudian pilih ***"Solve Analyses"***



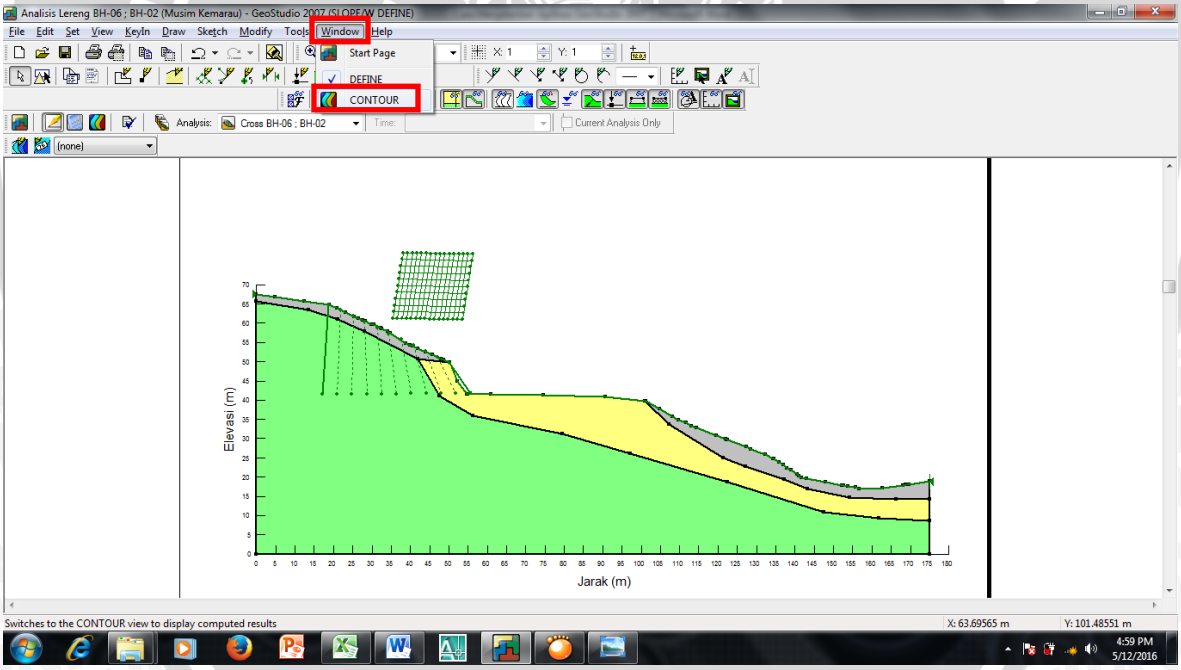
39. Muncul kotak dialog *Solve Analyses* kemudian klik ***"Start"***



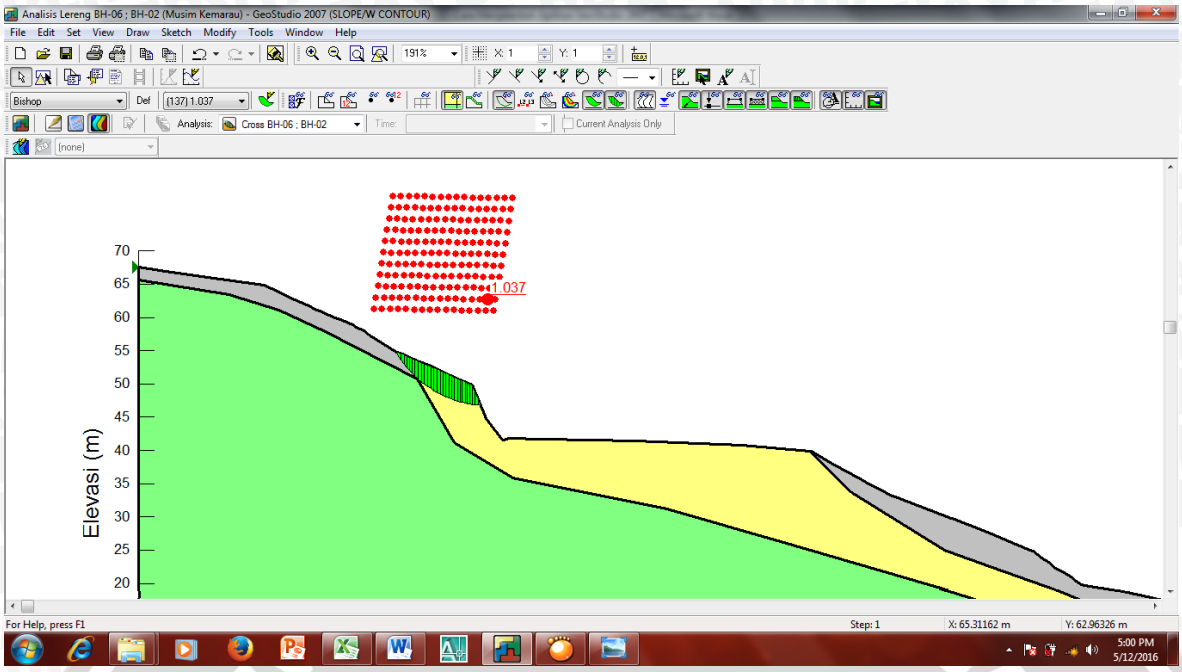
40. Akan muncul nilai faktor keamanan lereng dengan metode *Bishop*, kemudian klik ***"Close"***



41. Langkah selanjutnya adalah memunculkan nilai minimum dari faktor keamanan lereng tersebut. Dengan cara pilih ***"Window"*** kemudian pilih ***"Contour"***



42. Maka nilai minimum dari faktor keamanan lereng tersebut akan muncul seperti gambar dibawah ini.

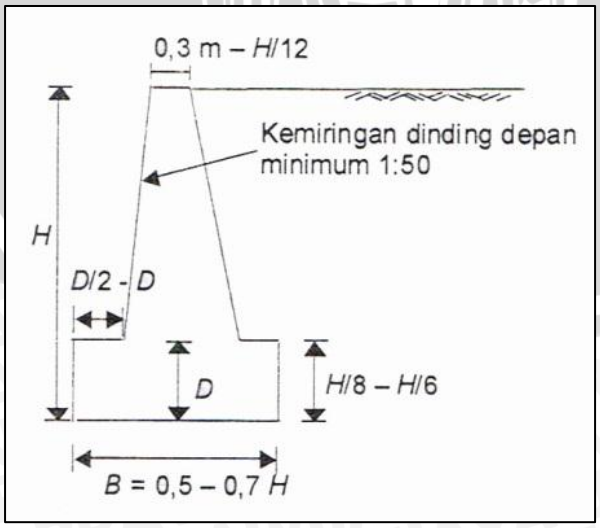


2.5. Perencanaan Tembok Penahan

Pada umumnya dimensi dinding penahan ditentukan dengan cara coba-coba. Beberapa percobaan hitungan tersebut akan menghasilkan bentuk yang dianggap paling cocok dan memenuhi syarat kestabilannya.

2.5.1. Bentuk Dinding Penahan

Estimasi dimensi dinding gravitasi dan dinding kantilever berdasarkan pangalaman diperlihatkan pada Gambar 2.14 dan Gambar 2.15. Dimensi-dimensi yang tercantum dalam gambar tersebut hanya sebagai petunjuk awal untuk langkah perancangan.

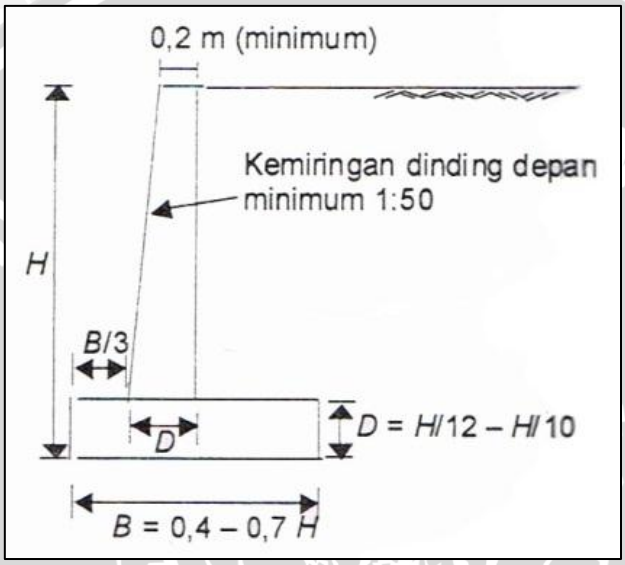


Gambar 2.14. Dinding Gravitasi

Sumber : Hardiyatmo (2006:404)

Bentuk dinding penahan tanah gravitasi harus sedemikian hingga resultan gaya-gaya terletak pada bagian tengah sejarak sepertiga lebar atau e < B/6 (e = eksentrisitas dihitung dari pusat fondasi). Tebal puncak dinding penahan dibuat diantara 0,30 – (H/12) meter.

Dimensi pelat dasar dinding penahan tanah kantilever dibuat sedimikian hingga eksentrisitas resultan beban terletak pada e < (B/6). Jika resultan beban jatuh di luar daerah tersebut, tekanan fondasi menjadi terlalu besar dan hanya sebagian luasan fondasi yang mendukung beban. Tebal puncak dinding minimum kira-kira 0,20 m. Hal ini, kecuali untuk memudahkan pengecoran beton, juga untuk keperluan keindahan.

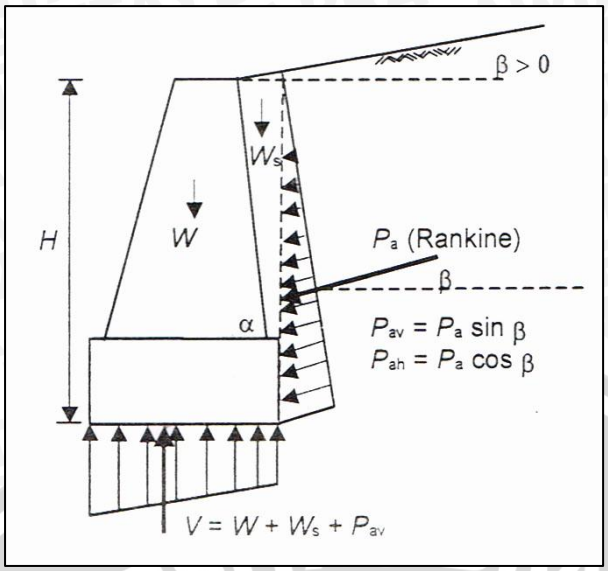


Gambar 2.15. Dinding Kantilever

Sumber : Hardiyatmo (2006:404)

2.5.2. Gaya-gaya pada Dinding Penahan

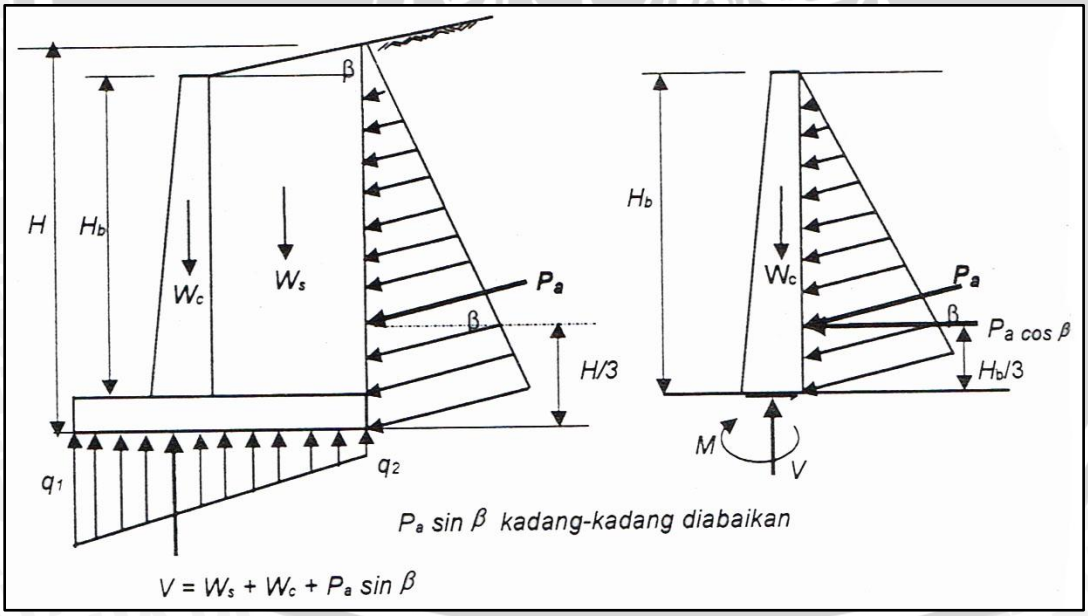
Gaya-gaya yang bekerja pada dinding penahan, umumnya diambil permeter lebar untuk dinding gravitasi dan dinding kantilever. Gaya-gaya yang bekerja pada dinding gravitasi dan dinding kantilever diperlihatkan pada Gambar 2.16 dan Gambar 2.17. Tekanan tanah aktif dihitung dari teori Coulomb.



Gambar 2.16. Gaya-gaya pada Dinding Gravitasi

Sumber : Hardiyatmo (2006:406)

Untuk dinding kantilever, gaya-gaya yang menyebabkan timbulya gaya lintang dan gaya momen yang terjadi pada badan dinding tidak sama dengan gaya-gaya yang diperhitungkan untuk menghitung stabilitas struktur terhadap penggeseran.



Gambar 2.17. Gaya-gaya pada Dinding Kantilever

Sumber : Hardiyatmo (2006:406)

2.5.3. Teori Tekanan Tanah (Teori Coulomb)

Pada hitungan tekanan tanah lateral teori Coulomb (1776), pengaruh gesekan antara dinding dan tanah urug dibelakangnya diperhitungkan. Sudut gesek antara dinding dan tanah (δ) bergantung pada kekasaran dinding dan regangan lateral pada waktu dinding bergerak.

Dalam menghitung tekanan tanah lateral teori Coulomb, terdapat beberapa anggapan-anggapan sebagai berikut :

1. Tanah adalah bahan yang isotropis dan homogen yang mempunyai sudut gesek dan kohesi.
2. Bidang longsor dan permukaan tanah urug adalah rata.
3. Gaya gesek didistribusikan secara sama disepanjang bidang longsor dan koefisien gesek (f = tg φ).
4. Tanah yang longsor berbentuk baji, dan merupakan satu kesatuan.
5. Terdapat gesekan antara dinding penahan dan tanah urug. Tanah yang longsor bergerak turun disepanjang dinding belakang mengembangkan gesekan.
6. Keruntuhan dinding penahan tanah dianggap masalah dua dimensi dengan memperhatikan dinding penahan tanah yang panjangnya tak terhingga.

Untuk dinding penahan tanah seperti pada Gambar 2.18, gaya tekanan tanah aktif total pada dinding dengan tinggi H, dinyatakan oleh Persamaan :

$P_a = 0{,}5\ H^2\ \gamma\ K_a$ ..... (2-25)

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha+\varphi)}{\sin^2\alpha\sin(\alpha-\delta)\left(1+\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi-\beta)}{\sin(\varphi-\delta)\sin(\varphi+\beta)}}\right)^2} \quad \text{..... (2-26)}$$

dengan :

P_a = gaya tekanan tanah aktif (ton)

H = tinggi dinding penahan tanah (m)

γ = berat volume tanah (t/m^3)

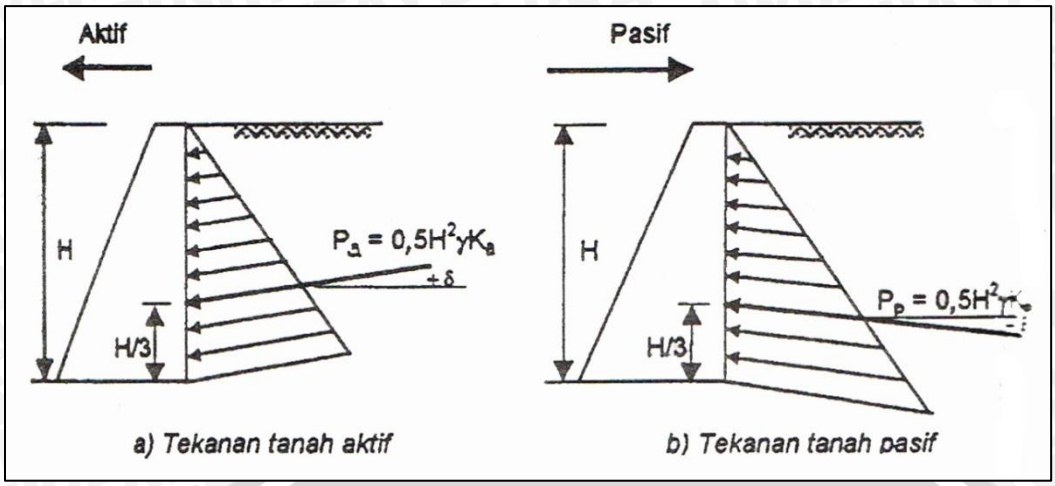
K_a = koefisien tekanan tanah aktif

α = sudut kemiringan dinding penahan tanah terhadap garis horizontal (derajat)

δ = sudut gesek antara dinding dan tanah (derajat)

β = sudut kemiringan permukaan tanah urug (derajat)

φ = sudut gesek dalam tanah (derajat)



Gambar 2.18. Tekanan Tanah Lateral Menurut Teori Coulomb

Sumber : Hardiyatmo (2006:380)

Secara sama, untuk dinding penahan tanah setinggi H, gaya tekanan tanah pasif total dinyatakan oleh Perasamaan :

$P_p = 0,5\ H^2\ \gamma\ K_p$ ..... (2-27)

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha-\varphi)}{\sin^2\alpha\sin(\alpha+\delta)\left(1-\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi+\beta)}{\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi+\beta)}}\right)^2} \quad \text{..... (2-28)}$$

dengan :

P_p = gaya tekanan tanah pasif (ton)

H = tinggi dinding penahan tanah (m)

γ = berat volume tanah (t/m^3)

K_p = koefisien tekanan tanah pasif

α = sudut kemiringan dinding penahan tanah terhadap garis horizontal (derajat)

δ = sudut gesek antara dinding dan tanah (derajat)

β = sudut kemiringan permukaan tanah urug (derajat)

φ = sudut gesek dalam tanah (derajat)

Nilai-nilai tekanan tanah aktif dan pasif teori Coulomb dengan berbagai variasi sudut gesek dalam (φ), sudut gesek antara tanah dan dinding (δ) dan sudut kemiringan permukaan tanah urug (β) dapat dilihat pada Tabel 2.7a dan Tabel 2.7b.

Tabel 2.7a. Koefisien Tekanan Tanah Aktif (K_a) Teori Coulomb

α = 90° ; β = -10°									
δ	φ = (°)								
(°)	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0,354	0,328	0,304	0,281	0,259	0,239	0,220	0,201	0,184
16	0,311	0,290	0,270	0,252	0,234	0,216	0,200	0,184	0,170
17	0,309	0,289	0,269	0,251	0,233	0,216	0,200	0,184	0,169
20	0,306	0,286	0,267	0,249	0,231	0,214	0,198	0,183	0,169
22	0,304	0,285	0,266	0,248	0,230	0,214	0,198	0,183	0,168
α = 90° ; β = -5°									
δ	φ = (°)								
(°)	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0,371	0,343	0,318	0,293	0,270	0,249	0,228	0,209	0,191
16	0,328	0,306	0,284	0,264	0,245	0,226	0,209	0,192	0,176
17	0,327	0,305	0,283	0,263	0,244	0,226	0,208	0,192	0,176
20	0,324	0,302	0,281	0,261	0,242	0,224	0,207	0,191	0,175
22	0,322	0,301	0,280	0,260	0,242	0,224	0,207	0,191	0,175
α = 90° ; β = 0°									
δ	φ = (°)								
(°)	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0,390	0,361	0,333	0,307	0,283	0,260	0,238	0,217	0,198
16	0,349	0,324	0,300	0,278	0,257	0,237	0,218	0,201	0,184
17	0,348	0,323	0,299	0,277	0,256	0,237	0,218	0,200	0,183
20	0,345	0,320	0,297	0,276	0,255	0,235	0,217	0,199	0,183
22	0,343	0,319	0,296	0,275	0,254	0,235	0,217	0,199	0,183
α = 90° ; β = +5°									
δ	φ = (°)								
(°)	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0,414	0,382	0,352	0,323	0,297	0,272	0,249	0,227	0,206
16	0,373	0,345	0,319	0,295	0,272	0,250	0,229	0,210	0,192
17	0,372	0,344	0,318	0,294	0,271	0,249	0,229	0,210	0,192
20	0,370	0,342	0,316	0,292	0,270	0,248	0,228	0,209	0,191
22	0,369	0,341	0,316	0,292	0,269	0,248	0,228	0,209	0,191
α = 90° ; β = +10°									
δ	φ = (°)								
(°)	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0,443	0,407	0,374	0,343	0,314	0,286	0,261	0,238	0,216
16	0,404	0,372	0,342	0,315	0,289	0,265	0,242	0,221	0,201
17	0,404	0,371	0,342	0,314	0,288	0,264	0,242	0,221	0,201
20	0,402	0,370	0,340	0,313	0,287	0,263	0,241	0,220	0,201
22	0,401	0,369	0,340	0,312	0,287	0,263	0,241	0,220	0,201

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Lanjutan Tabel 2.7a. Koefisien Tekanan Tanah Aktif (K_a) Teori Coulomb

α = 90° ; β = +15°									
δ (°)	φ = (°)								
	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0,482	0,440	0,402	0,367	0,334	0,304	0,276	0,251	0,227
16	0,447	0,408	0,372	0,340	0,310	0,283	0,258	0,234	0,213
17	0,447	0,407	0,372	0,339	0,310	0,282	0,257	0,234	0,212
20	0,446	0,406	0,371	0,338	0,309	0,282	0,257	0,234	0,212
22	0,446	0,406	0,371	0,338	0,309	0,282	0,257	0,234	0,212

Sumber : Hardiyatmo (2006:381)

Tabel 2.7b. Koefisien Tekanan Tanah Pasif (K_p) Teori Coulomb

α = 90° ; β = -10°									
δ (°)	φ = (°)								
	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	1,914	2,053	2,204	2,369	2,547	2,743	2,957	3,193	3,452
16	2,693	2,956	3,247	3,571	3,934	4,344	4,807	5,335	5,940
17	2,760	3,034	3,339	3,679	4,062	4,493	4,983	5,543	6,187
20	2,980	3,294	3,645	4,041	4,488	4,997	5,581	6,255	7,039
22	3,145	3,490	3,878	4,317	4,817	5,389	6,050	6,819	7,720
α = 90° ; β = -5°									
δ (°)	φ = (°)								
	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	2,223	2,392	2,577	2,781	3,004	3,250	3,523	3,826	4,163
16	3,367	3,709	4,094	4,529	5,024	5,591	6,243	7,000	7,883
17	3,469	3,828	4,234	4,694	5,218	5,820	6,516	7,326	8,277
20	3,806	4,226	4,704	5,250	5,879	6,609	7,462	8,468	9,666
22	4,064	4,532	5,067	5,684	6,400	7,236	8,222	9,397	10,809
α = 90° ; β = 0°									
δ (°)	φ = (°)								
	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	2,561	2,770	3,000	3,255	3,537	3,852	4,204	4,599	5,045
16	4,195	4,652	5,174	5,775	6,469	7,279	8,230	9,356	10,704
17	4,346	4,830	5,385	6,025	6,767	7,636	8,662	9,882	11,351
20	4,857	5,436	6,105	6,886	7,804	8,892	10,194	11,771	13,705
22	5,253	5,910	6,675	7,574	8,641	9,919	11,466	13,364	15,726

Lanjutan Tabel 2.7b. Koefisien Tekanan Tanah Pasif (K_p) Teori Coulomb

α = 90° ; β = +5°									
δ (°)	φ = (°)								
	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	2,943	3,203	3,492	3,815	4,177	4,585	5,046	5,572	6,173
16	5,250	5,878	6,609	7,464	8,474	9,678	11,128	12,895	15,076
17	5,475	6,146	6,929	7,850	8,942	10,251	11,836	13,781	16,201
20	6,249	7,074	8,049	9,212	10,613	12,321	14,433	17,083	20,468
22	6,864	7,820	8,960	10,334	12,011	14,083	16,685	20,011	24,352
α = 90° ; β = +10°									
δ (°)	φ = (°)								
	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	3,385	3,713	4,080	4,496	4,968	5,507	6,125	6,841	7,673
16	6,652	7,545	8,605	9,876	11,417	13,309	15,665	18,647	22,497
17	6,992	7,956	9,105	10,492	12,183	14,274	16,899	20,254	24,633
20	8,186	9,414	10,903	12,733	15,014	17,903	21,636	26,569	33,270
22	9,164	10,625	12,421	14,659	17,497	21,164	26,013	32,602	41,864
α = 90° ; β = +15°									
δ (°)	φ = (°)								
	26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	3,913	4,331	4,807	5,352	5,981	6,710	7,563	8,570	9,768
16	8,611	9,936	11,555	13,557	16,073	19,291	23,494	29,123	36,894
17	9,139	10,590	12,373	14,596	17,413	21,054	25,867	32,409	41,604
20	11,049	12,986	15,422	18,541	22,617	28,081	35,629	46,459	62,760
22	12,676	15,068	18,130	22,136	27,507	34,930	45,584	61,627	87,356

Sumber : Hardiyatmo (2006:382)

2.5.4. Prosedur Perancangan Dinding Penahan Tanah

Secara umum, langkah-langkah hitungan perancangan struktur dinding penahan tanah dapat dilakukan sebagai berikut :

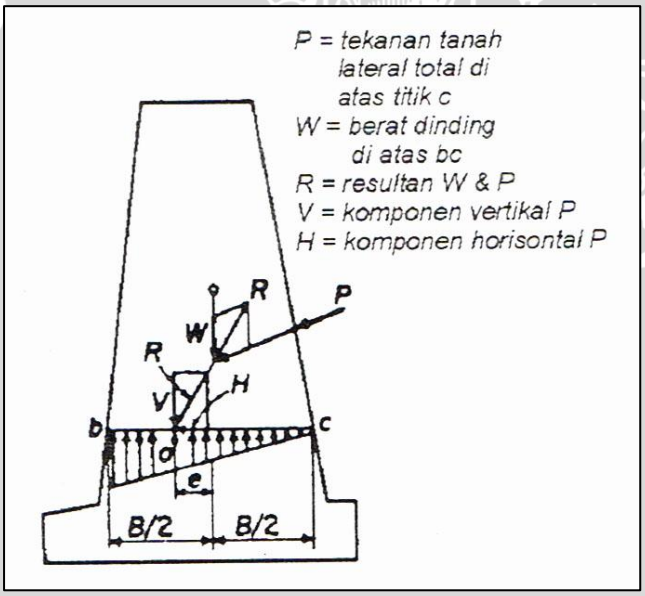
1. Dipilih bentuk dinding penahan tanah, termasuk memilih dimensi dinding vertikal, tebal dan lebar pelat fondasi. Untuk keperluan ini, Gambar 2.14 dapat dijadikan petunjuk awal.
2. Dengan parameter-paremeter tanah yang telah diketahui, dihitung gaya-gaya yang bekerja di atas dasar fondasi dinding penahan.
3. Tentukan letak resultan gaya-gaya yang bekerja. Letak dari resultan tersebut digunakan untuk mengetahui kestabilan dinding penahan terhadap bahaya penggulingan.
4. Dihitung faktor aman terhadap penggulingan dan penggeseran.

5. Dihitung tekanan yang terjadi pada dasar fondasi. Tekanan maksimum tidak boleh melebihi kapasitas dukung tanah izin (q_u).
6. Dirancang bagian-bagian pembentuk struktur, seperti : menghitung dimensi dan penulangan fondasi maupun dinding.

Perancangan masing-masing bagian dari dinding penahan tanah dilakukan sebagai berikut :

2.5.4.1. Dinding Penahan Tanah Gravitasi

Dinding gravitasi umumnya dibuat dari pasangan batu, atau beton. Bila dinding panahan dibuat dari beton, sedikit tulangan dibutuhkan untuk menanggulangi perubahan temperatur. Dimensi dinding penahan harus dibuat sedemikian hingga tidak terdapat tegangan tarik pada badan dinding. Untuk itu pada setiap titik pada potongannya, tegangan-tegangan yang terjadi pada dinding dihitung dengan cara sebagai berikut (lihat Gambar 2.19) :



Gambar 2.19. Tegangan pada Dinding Gravitasi

Sumber : Hardiyatmo (2006:408)

1. Tegangan vertikal maksimum (desak) pada badan dinding :

$$\sigma = \frac{V}{B}\left(1 + \frac{6e}{B}\right) \leq \text{ kuat desak izin bahan dinding} \quad \text{..... (2-29)}$$

2. Tegangan vertikal minimum pada badan dinding :

$$\sigma = \frac{V}{B}\left(1 + \frac{6e}{B}\right) \geq 0 \quad \text{..... (2-30)}$$

3. Gaya lintang pada badan dinding :

$$\tau = \frac{H}{B} \leq \text{ kuat geser izin bahan dinding} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}31)$$

dengan :

V, H = komponen gaya vertikal dan horizontal

B = lebar bagian potongan yang ditinjau

e = eksentrisitas

2.5.4.2. Dinding Penahan Tanah Kantilever

Bagian-bagian dinding kantilever terdiri dari : dinding, pelat fondasi belakang dan pelat fondasi depan. Pada setiap bagian ini dirancang seperti cara merancang struktur kantilever. Untuk merancang pelat fondasi, tekanan tanah yang terjadi pada bagian dasar fondasi yang dihitung lebih dulu, yaitu dengan menganggap distribusi tekanan tanah linier.

Tekanan pada tanah dasar akibat beban dinding penahan yang terjadi pada ujung-ujung pelat fondasi yang dihitung dengan cara sebagai berikut (Gambar 2.20) :

1. Bila e ≤ B/6

$$q = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \quad \text{.....} \quad (2\text{-}32)$$

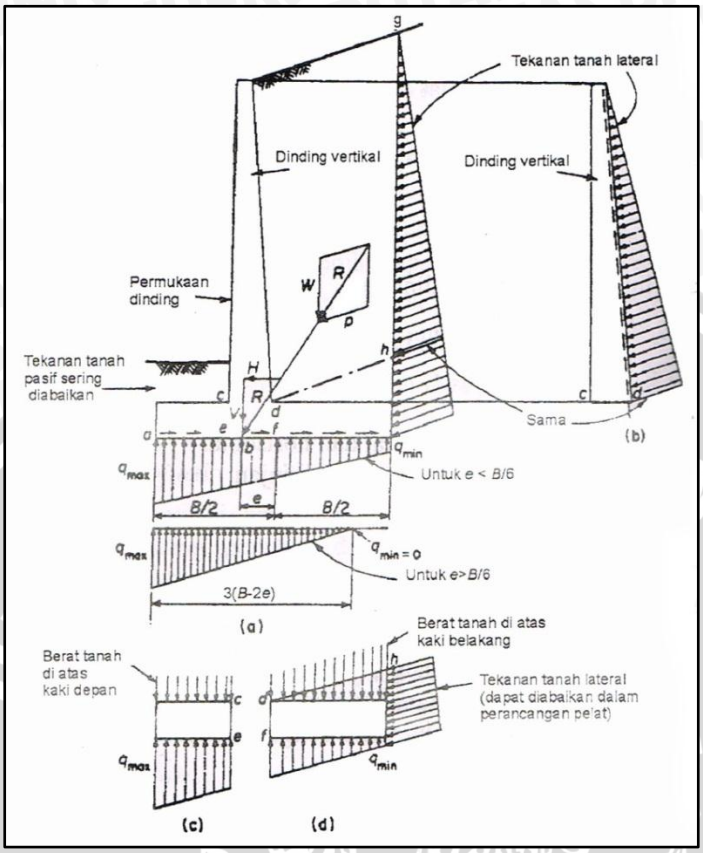
2. Bila e > B/6

$$q_{mak} = \frac{2V}{3(B - 2e)} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}33)$$

Bila e ≤ B/6, maka tekanan dinding ke tanah yang terjadi berbentuk trapezium. Sedang bila e > B/6, maka diagram tekanan berupa segitiga. Pelat fondasi dianggap sebagai struktur kantilever yang bentangnya dibatasi oleh bagian vertikal dari tubuh dinding penahan. Gaya-gaya yang bekerja pada dinding penahan, dapat di lihat pada Gambar 2.20. pelat fondasi depan, dianggap sebagai pelat yang dijepit oleh dinding vertikal di bagian depan. Gaya-gaya yang bekerja, adalah gaya tekanan tanah ke atas, dikurangi oleh berat tanah di atas pelat depan. Pada bagian depan ini, pelat cenderung mengalami momen positif dengan tegangan tarik terletak pada sisi bawah.

Bagian pelat fondasi belakang, dianggap terjepit pada batas permukaan dinding vertikal di bagian belakang. Gaya tekanan tanah bekerja ke atas, sedang tekanan akibat tanah di atas pelat bekerja di bawah. Tekanan neto yang dihasilkan, cenderung untuk mengakibatkan momen negative pada pelat belakang, dengan tegangan tarik pada sisi atas pelat. Bagian tubuh dinding penahan dianggap sebagai struktur kantilever yang terjepit pada pelat

fondasi bagian atas. Dengan gaya-gaya yang telah diketahui dapat dihitung dimensi komponen-komponen dinding penahan dan penulangannya.



Gambar 2.20. Gaya-gaya pada Dinding Kantilever

Sumber : Hardiyatmo (2006:410)

2.6. Pengaruh Gempa

Gempa bumi dapat mengakibatkan gerakan clan keruntuhan. Lereng alam maupun buatan. Oleh karena itu perlu diperhatikan dalam perhitungan faktor aman stabilitas lereng. Akibat lain dari gempa bumi adalah adanya :

- Liquefaction pada massa tanah (terutama pada tanah-tanah granuler).
- Perubahan tekanan air pori clan tegangan efektif dalam massa tanah.
- Timbulnya retak-retak vertikal yang dapat mereduksi kuat geser tanah.

Untuk memperhitungkan pengaruh gravitasi akibat gempa, hal yang sering dilakukan dalam analisis stabilitas lereng adalah dengan menggunakan konstanta numerik yang biasanya disebut koefisien gempa (k_g). koefisien ini diberikan dalam persen dari gravitasi. Sebagai contoh, koefisien gravitasi 10% (0,1g) sering digunakan dalam hitungan. Jadi, gaya-gaya dinamis dianggap sebagai gaya statis, yang kadang-kadang disebut *pseurlostatic analysis*. Pemakaian koefisien gempa 0,1g hanyalah didasarkan pada pertimbangan

empirik yang tanpa dasar pembenaran. Menurut Cernica (1994), belum ada data hasil analisis yang menunjukan ketepatan hasil analisis yang didasarkan pada asumsi tersebut.

Penyelidikan di Universitas California, Berkeley (Seed et al., 1964) dan yang lain titik lemah dari analisis gempa di atas adalah belum mengakomodasi adanya pengaruh-pengaruh deformasi, macam tanah dan geometri lereng. Sebagai contoh, tanah pasir halus dapat mengalami liquefaction, sedang pasir kasar tidak. Pasir kasar, biasanya mengalami deformasi yang terkonsentrasi pada zona geser yang tipis di dekat permukaan lereng. Selain itu, bila pembebanan secara berulang-ulang (gempa), nilai kohesi dan sudut gesek dalam efektif, pada kebanyakan tanah-tanah kohesif, nilainya berbeda secara signifikan dari nilai yang diperoleh dari uji statis di laboratorium.

Faktor beban akibat gempa yang digunakan dalam perencanaan didasarkan pada Pedoman Penentuan Beban Gempa Pada Bangunan Pengairan (tahun 1999/2000).

Dari gambar peta zona gempa dapat diketahui bahwa pulau-pulau di Indonesia dibagi menjadi 6 daerah dengan parameter gempa yang berbeda-beda.

Koefisien gempa dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$a_d = Z * a_c * v$ ..... (2-34)

$k = a_d / g$ ..... (2-35)

dengan :

k = koefisien gempa

z = koefisien zona gempa

a_c = percepatan gempa dasar (gal)

g = percepatan gravitasi (cm/det^2)

v = faktor koreksi pengaruh jenis tanah setempat

a_d = percepatan gempa terkoreksi (gal)

Tabel 2.8. Faktor Koreksi Pengaruh Jenis Tanah Batuan

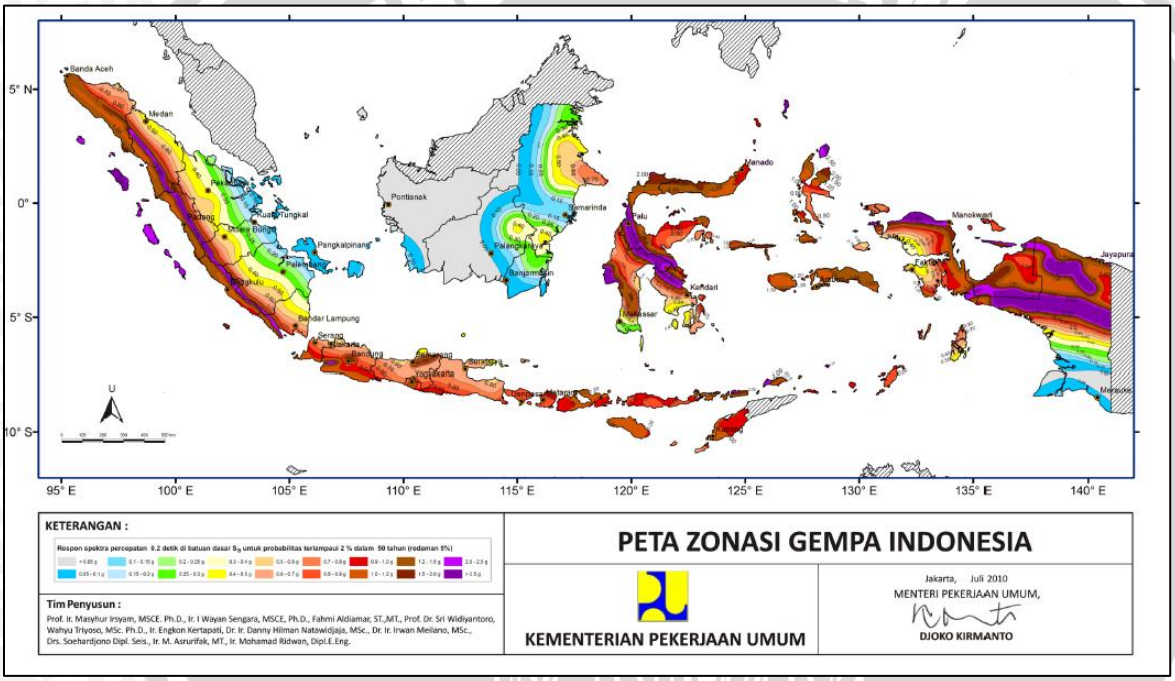
Jenis Batuan Dasar	Periode Predominan (Ts)	Faktor Koreksi (V)
Batuan	Ts < 0,25	0,80
Diluvium	0,25 < Ts < 0,50	1,00
Aluvium	0,50 < Ts < 0,75	1,10
Aluvium Lunak	Ts > 0,75	1,20

Sumber : Pedoman Analisis Dinamik Bendungan Urugan (2008:52)

Tabel 2.9. Periode Ulang dan Percepatan Dasar Gempa

Periode Ulang (Tahun)	A_c (gal = cm/det^2)
10	90
20	120
50	160
100	190
200	220
500	250
1000	280
5000	330
10000	350

Sumber : Pedoman Analisis Dinamik Bendungan Urugan (2008:53)



Gambar 2.21. Peta Zona Gempa Indonesia

Sumber : Peta *Hazard* Gempa Indonesia (2010:14)

2.7. Stabilitas Bangunan

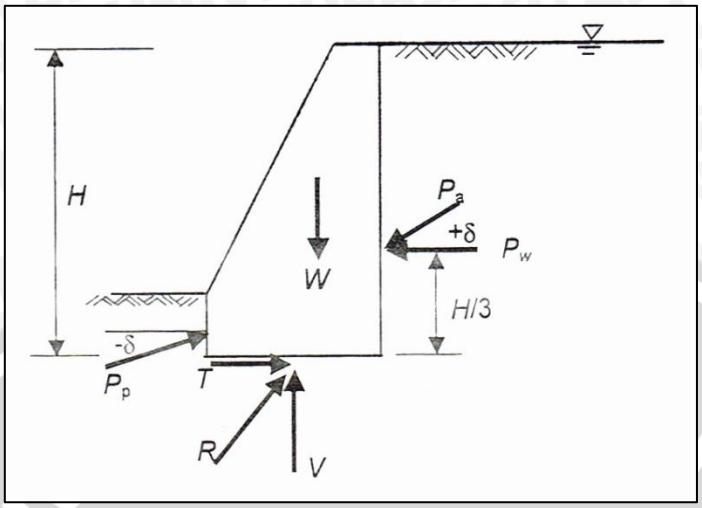
2.7.1. Perhitungan Stabilitas Dinding Penahan

Gaya-gaya yang bekerja pada dinding penahan tanah gravitasi meliputi (lihat Gambar 2.22) :

1. Berat sendiri dinding panahan (W)
2. Gaya tekanan tanah aktif total tanah urug (P_a)
3. Gaya tekanan tanah pasif total di depan dinding (P_p)
4. Tekanan air pori di dalam tanah (P_w)

5. Reaksi tanah dasar (*R*)

Jika dinding dalam keadaan seimbang, jumlah vektor gaya-gaya akan sama dengan nol.



Gambar 2.22. Gaya-gaya yang Bekerja pada Dinding Penahan Tanah

Sumber : Hardiyatmo (2006:395)

Analisis stabilitas dinding penahan tanah gravitasi ditinjau terhadap hal-hal sebagai berikut :

1. Faktor aman terhadap penggeseran dan penggulingan harus mencukupi.
2. Tekanan yang terjadi pada tanah dasar fondasi harus tidak boleh melebihi kapasitas dukung tanah izin.
3. Stabilitas lereng secara keseluruhan harus memenuhi syarat.

Selain itu, jika tanah dasar mudah mampat, penurunan tak seragam yang terjadi harus tidak boleh berlebihan.

2.7.2. Stabilitas Terhadap Penggeseran

Gaya-gaya yang terjadi sehingga menggeser dinding penahan tanah gravitasi akan ditahan oleh :

1. Gesekan antara tanah dengan dasar fondasi
2. Tekanan tanah pasif bila di depan dinding penahan terdapat tanah timbunan.

Faktor aman terhadap penggeseran (F_{gs}), didefinisikan sebagai :

$$F_{gs} = \frac{\sum R_h}{\sum P_h} \geq 1{,}5 \quad \text{..... (2-36)}$$

- Untuk tanah granuler (c = 0) :

$$\sum R_h = Wf$$

$$= Wtg\delta_b \quad ; \; dengan \; \delta_b \leq \varphi \quad \text{..... (2-37)}$$

- Untuk tanah kohesif (φ = 0) :

$$\sum R_h = c_a B \quad \text{..... (2-38)}$$

- Untuk tanah c – φ (φ > 0 dan c > 0) :

$$\sum R_h = c_a B + W\,tg\;\delta_b \quad \text{..... (2-39)}$$

dengan :

$\sum R_h$ = tahanan dinding penahan tanah terhadap penggeseran

W = berat total dinding penahan dan tanah di atas pelat fondasi

δ_b = sudut gesek antara tanah dan dasar fondasi, biasanya diambil 1/3 – (2/3) φ

c_a = $a_d \times c$ = adhesi antara tanah dan dasar dinding

c = kohesi tanah dasar

a_d = faktor adhesi

B = lebar fondasi (m)

$\sum P_h$ = jumlah gaya-gaya horizontal

F = tg δ_b = koefisien gesek antara tanah dasar dan dasar fondasi

Faktor aman terhadap penggeseran dasar fondasi (F_{gs}) minimum, diambil 1,5. Bowles (1997) menyarankan :

$F_{gs} \geq$ 1,5 untuk tanah dasar granuler

$F_{gs} \geq$ 2,0 untuk tanah dasar kohesif.

Tabel 2.10. Nilai-nilai *f* dari Berbagai Macam Jenis Tanah Dasar

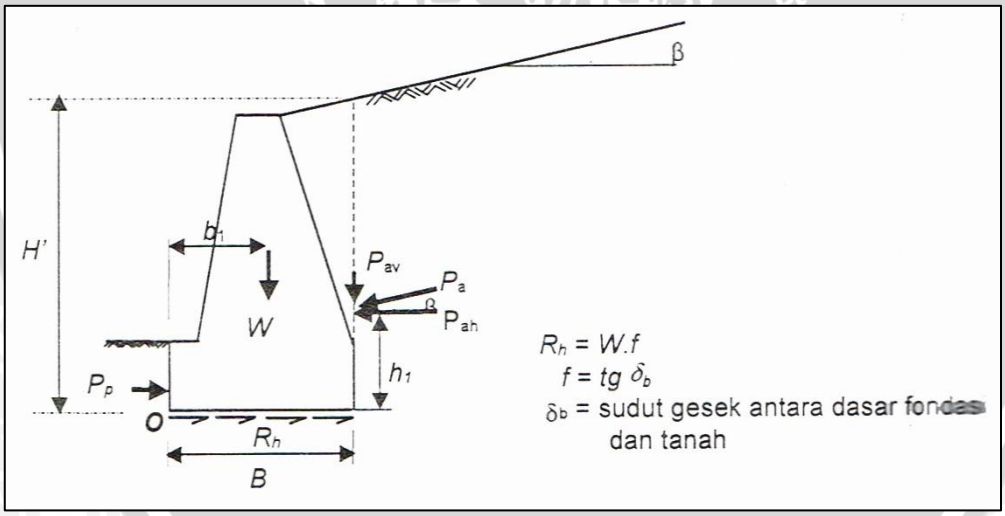
Jenis Tanah Dasar Fondasi	***f* = tg *δ***
Tanah granuler kasar tak mengandung lanau atau lempung	0,55
Tanah granuler kasar mengandung lanau	0,45
Tanah lanau tak berkohesi	0,35
Batu keras permukaan kasar	0,60

Sumber : Hardiyatmo (2006:397)

Jika dasar fondasi sangat kasar, seperti beton yang dicor langsung ke tanah, koefisien gesek $f = \text{tg}\ \delta_b = \text{tg}\ \varphi$, dengan φ adalah sudut gesek dalam tanah dasar.

Perhatian perlu diberikan jika dinding penahan tanah terletak pada tanah lanau atau lempung. Segera sebelum fondasi dicor, dasar fondasi lebih baik digali sedalam 10 cm, setelah itu ditimbun dengan tanah pasir kasar atau pasir campur kelikir yang dipadatkan setebal 10 cm. koefisien gesek antara pasir dan tanah di bawahnya (*f*) dapat diambil 0,35 (Terzaghi dan Peck, 1948). Tetapi, jika kuat geser tak terdrainasi (*undrained strength*) dari lapisan lunaknya lebih kecil dari tahanan geser dasar fondasi, penggeseran akan terjadi pada tanah lunak di bawah dasar fondasi tersebut. Untuk itu, nilai adhesi antara dasar fondasi dan tanah bawahnya dianggap sama dengan nilai kohesi tanah (c), dan sudut gesek dalam (φ) dianggap sama dengan nol. Jika tanah berupa lempung kaku atau keras, tanah dasar harus dibuat kasar sebelum pengecoran. Hal ini untuk menyakinkan berkembangnya kohesi secara penuh. Dalam menggunakan nilai kohesi (c), pengurangan kohesi akibat penggalian, atau gangguan waktu pelaksanaan harus diperhitungkan.

Jika dinding penahan tanah harus didukung oleh fondasi tiang semua beban harus dianggap didukung oleh tiang. Karena itu tanahan gesek dan adhesi pada dasar fondasi harus tidak diperhitungkan.



Gambar 2.23. Stabilitas Terhadap Penggeseran dan Penggulingan

Sumber : Hardiyatmo (2006:398)

2.7.3. Stabilitas Terhadap Penggulingan

Tekanan tanah lateral yang diakibatkan oleh tanah urug di belakang dinding penahan, cenderung menggulingkan dinding dengan pusat rotasi pada ujung kaki depan pelat fondasi. Momen penggulingan ini, dilawan oleh momen akibat berat sendiri dinding penahan dan momen akibat berat tanah di atas plat fondasi (Gambar 2.23).

Faktor aman akibat terhadap penggulingan (F_{gl}), didefinisikan sebagai :

$$F_{gl} = \frac{\sum M_w}{\sum M_{gl}} \geq 1{,}5 \quad \text{..... (2-40)}$$

dengan :

$\sum M_w$ = Wb_1

$\sum M_w$ = $\sum P_{ah}\, h_1 + \sum P_{av} B$

$\sum M_w$ = momen yang melawan penggulingan (kN.m)

$\sum M_{gl}$ = momen yang mengakibatkan penggulingan (kN.m)

W = berat tanah di atas pelat fondasi + berat sendiri dinding penahan (kN)

B = lebar kaki dinding penahan (m)

$\sum P_{ah}$ = jumlah gaya-gaya horizontal (kN)

$\sum P_{av}$ = jumlah gaya-gaya vertikal (kN)

Tahanan tanah pasif, oleh tanah yang berada di depan kaki dinding depan sering diabaikan dalam hitungan stabilitas. Jika tahanan tanah pasif yang ditimbulkan oleh pengunci pada dasar fondasi diperhitungkan, maka nilainya harus direduksi untuk mengantisipasi pengaruh-pengaruh erosi, iklim dan retakan akibat tegangan-tegangan tarik tanah dasar yang kohesif.

2.7.4. Stabilitas Terhadap Keruntuhan Kapasitas Dukung Tanah (Terzaghi)

Kapasitas dukung ultimit (q_u) untuk fondasi memanjang dinyatakan oleh persamaan sebagai berikut :

$$q_u = cN_c + D_f \gamma N_q + 0{,}5\, B\gamma N_\gamma \quad \text{..... (2-41)}$$

dengan :

c = kohesi tanah (kN/m^2)

D_f = kohesi tanah (m)

γ = berat volume tanah (kN/m^3)

B = lebar fondasi dinding penahan tanah (m)

N_c, N_q dan N_γ = faktor-faktor kapasitas dukung Terzaghi (Tabel 2.10)

Tabel 2.11. Nilai-nilai Faktor Kapasitas Dukung Terzaghi

φ	Keruntuhan Geser Umum			φ	Keruntuhan Geser Lokal		
	N_c	N_q	N_γ		$N_{c'}$	$N_{q'}$	$N_{\gamma'}$
0	5,7	1,0	0,0	**0**	5,7	1,0	0,0
5	7,3	1,6	0,5	**5**	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	**10**	8,0	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	**15**	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,4	5,0	**20**	11,8	3,9	1,7
25	25,1	12,7	9,7	**25**	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	**30**	19,0	8,3	5,7
34	52,6	36,5	35,0	**34**	23,7	11,7	9,0
35	57,8	41,4	42,4	**35**	25,2	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	**40**	34,9	20,5	18,8
45	172,3	173,3	297,5	**45**	51,2	35,1	37,7
48	258,3	287,9	780,1	**48**	66,8	50,5	60,4
50	347,6	415,1	1153,2	**50**	81,3	65,6	87,1

Sumber : Hardiyatmo (2006:94)

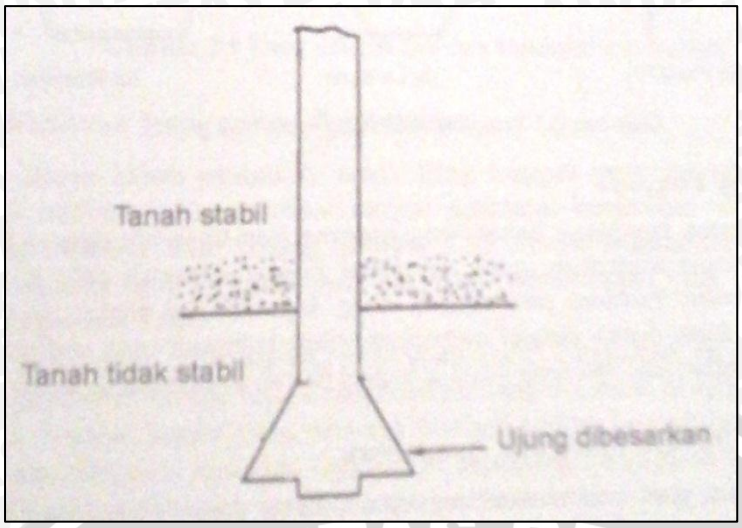
2.8. Tiang Bor (*Bore Pile*)

2.8.1. Umum

Tiang bor dipasang di dalam tanah dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu, baru kemudian diisi dengan tulangan dan dicor beton. Tiang ini biasanya dipakai pada tanah yang stabil dan kaku, sehingga memungkinkan untuk membentuk lubang yang stabil dengan alat bor. Jika tanah mengandung air, pipa besi dibutuhkan untuk menahan dinding lubang lubang dan pipa ini ditarik ke atas pada waktu pengecoran beton. Pada tanah yang keras atau batuan lunak, dasar tiang dapat dibesarkan untuk menambah tahanan dukung ujung tiang (Hardiyatmo, 2008:67).

Keuntungan penggunaan tiang bor, antara lain :

1. Tidak ada resiko kenaikan muka tanah.
2. Kedalaman tiang dapat divariasikan.
3. Tanah dapat diperiksa dan dicocokan dengan data laboratorium.
4. Tiang dapat dipasang sampai kedalaman yang dalam, dengan diameter besar, dan dapat dilakukan pembesaran ujung bawahnya jika tanah dasar berupa lempung atau batu lunak.
5. Penulangan tidak dipengaruhi oleh tegangan pada waktu pengangkutan dan pemancangan.



Gambar 2.24. Tiang Bor

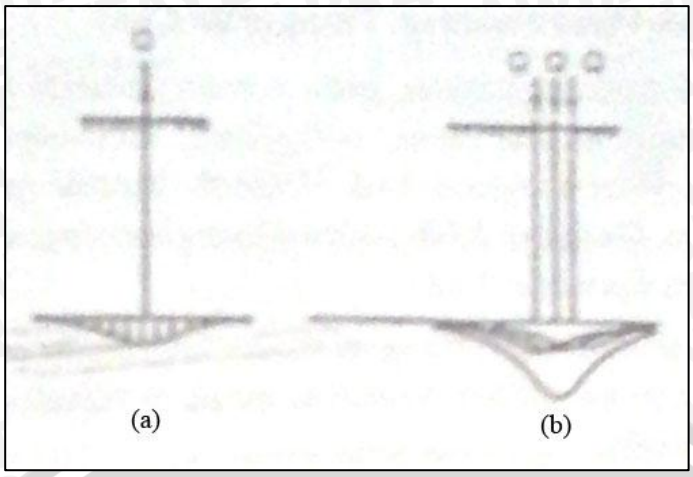
Sumber : Hardiyatmo (2008:67)

Kerugian penggunaan tiang bor, antara lain :

1. Pengeboran dapat mengakibatkan gangguan kepadatan, bila tanah berupa pasir atau tanah yang berkelikir.
2. Pengecoran beton sulit bila dipengaruhi air tanah karena mutu beton tidak dapat dikontrol dengan baik.
3. Air yang mengalir ke dalam lubang bor dapat mengakibatkan gangguan tanah, sehingga mengurangi kapasitas dukung tanah terhadap tiang.
4. Pembesaran ujung bawah tiang tidak dapat dilakukan bila tanah berupa pasir.

2.8.2. Jarak Tiang-tiang Bor

Umumnya, tiang-tiang jarang dipasang pada kedudukan yang benar-benar lurus dan tepat pada titik lokasi yang telah ditentukan. Meskipun tiang dipasang pada titik yang benar-benar tepat, kadang-kadang masih terdapat momen lentur kolom yang harus ditahan kepala tiang. Karena itu, disarankan agar paling sedikit menggunakan tiga tiang untuk fondasi kolom utama dan dua tiang untuk fondasi dinding memanjang.



Gambar 2.25. Distribusi Tekanan pada Tanah di Bawah Tiang
Sumber : Hardiyatmo (2008:193)

Jika sebuah tiang (tiang dukung ujung) dibabani dengan beban Q, tanah di bawah dasar tiang menjadi tertekan dengan diagram tekanan seperti yang terlihat pada Gambar 2.25a. Kalau jumlah tiang tidak hanya satu dan disusun pada jarak tertentu, maka zone tanah tertekan menjadi tumpang tindih. Pada kondisi ini, tekanan total pada titik tertentu akan sama dengan jumlah tekanan yang diakibatkan oleh masing-masing tiang (Gambar 2.25b), yang besarnya dapat beberapa kali lebih besar dari tekanan akibat tiang tunggal. Kondisi demikian dapat pula terjadi pada kelompok tiang pada tipe tiang gesek. Kecuali, jika tiang-tiang dipancang pada jarak yang besar. Namun jarak tiang yang terlalu besar menyebabkan biaya pembuatan pelat penutup tiang (*pile cap*) menjadi tidak ekonomis. Tabel 2.11. memberikan jarak tiang minimum dibutuhkan untuk menekan biaya pembuatan pelat penutup tiang (*pile cap*) yang disarankan oleh Teng (1962).

Tabel 2.12. Jarak Tiang Minimum (*Teng, 1962*)

Fungsi Tiang	Jarak As-as Tiang Minumum
Tiang dukung ujung dalam tanah keras	2 – 2,5D atau 75 cm
Tiang dukung ujung pada batuan keras	2D atau 60 cm
Tiang gesek	3 – 5D, atau 75 cm

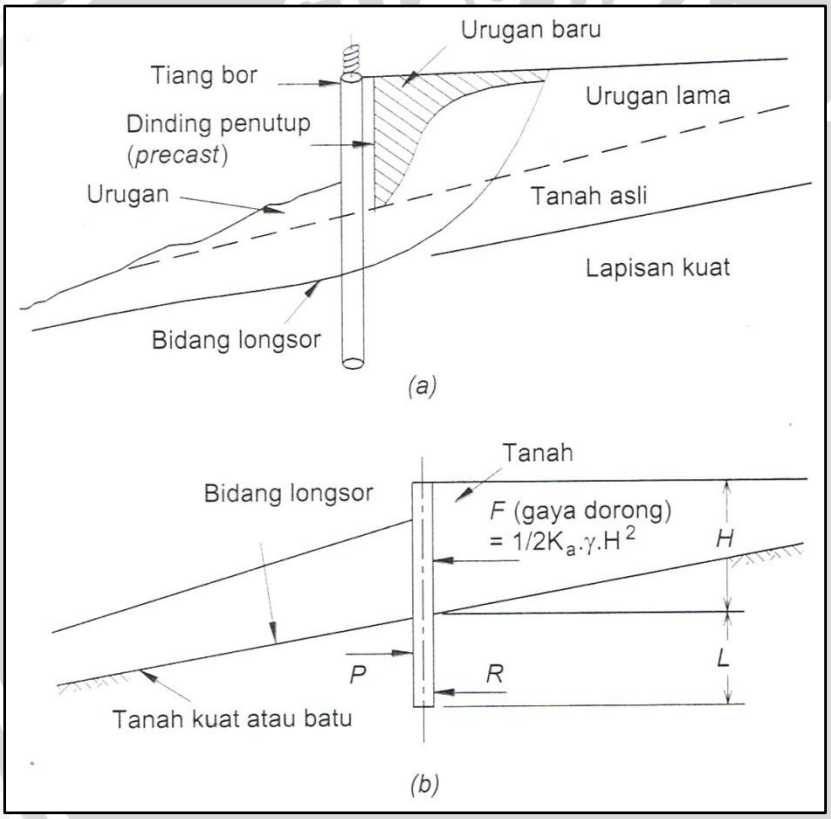
Sumber : Hardiyatmo (2008:193)

Pada jenis-jenis tanah tertentu, seperti tanah pasir padat, tanah plastis, lanau jenuh dan lain-lainnya, jarak tiang yang terlalu dekat menyebabkan bahaya gerakan tanah secara lateral dan penggemburan tanah. Sedang pada pasir tidak padat, jarak yang terlalu dekat

lebih disukai karena pemancangan dapat memadatkan tanah di sekitar tiang. Jarak tiang yang dekat dapat mengurangi pengaruh gesek dinding negatif.

Dalam area perumahan padat, pelandaian lereng atau timbunan *berm* untuk menambah gaya penahan longsoran tidak efektif lagi digunakan. Hal ini karena biasanya ruang pembebasan tanah sangat terbatas. Dalam hal demikian, tiang-tiang bor (berdiameter 0,60 – 1,5 m) dapat dipasang sebagai perkuatan lereng (Gambar 2.26a).

Tiang-tiang harus dipasang sampai kedalaman tertentu hingga menembus lapisan keras untuk menahan gerakan massa tanah yang akan longsor (Gambar 2.26b). Kedalaman tiang harus lebih dalam dari bidang longsor potensial. Karena pengaruh lengkung (*arching effect*) tanah yang berada diantara tiang-tiang.



Gambar 2.26. (a) Dinding dari Tiang-tiang Bor untuk Stabilisasi Longsoran yang Dalam.
(b) Konsep Perancangan Dinding dari Tiang Bor

Sumber : Hardiyatmo (2012:266)