BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut. (Braja M. Das, 1985)

Proses pembentukan tanah secara fisik yang mengubah batuan menjadi batuan-batuan 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. Pelapukan akibat proses kimia dapat terjadi oleh pengaruh oksigen, karbondioksida, air, dan proses-proses kimia yang lain. Jika hasil pelapukan masih berada di tempatnya maka tanah ini disebut tanah residual. Jika tanah berpindah tempatnya disebut tanah terangkut. (Harry Christady Hardiyatmo, 1992)

Istilah pasir, lempung, lanau, dan lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel-partikel pada batas 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. (Harry Christady Hardiyatmo, 1992)

Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah pasir. Tanah pasir adalah tanah yang terbentuk dari batuan beku serta batuan sedimen yang memiliki butir kasar dan berkerikil.

2.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem *Unified* (U.S.C.S)

Sistem ini pada mulanya diperkenalkan oleh Casagrande pada tahun 1942 untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang. Pada masa kini, sistem ini telah disempurnakan dan digunakan secara luas oleh para ahli teknik. Sistem klasifikasi ini telah diakui secara internasional serta dipakai untuk pekerjaan teknik pondasi, seperti: bendungan, bangunan dan konstruksi yang hampir sama. Sering juga

dipergunakan untuk desain lapangan udara dan spesifikasi pekerjaan tanah bagi jalan. Sistem *Unified* merupakan hasil pengujian laboratorium. Pengujian yang digunakan adalah analisa ukuran butir dan batas-batas Atterberg.

Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu (Braja M. Das, 1985) :

a. Tanah berbutir kasar (*coarse grained soil*) yaitu tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G atau S.
b. Tanah berbutir halus (*fine grained soil*) yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau-organik dan lempung-organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck*, dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Simbol-simbol lain yang digunakan untuk klasifikasi USCS adalah:

- W – *Well Graded* (tanah dengan gradasi baik)
- P – *Poorly Graded* (tanah dengan garadasi buruk)
- L – *Low plasticity* (plastisitas rendah, LL < 50)
- H – *High plasticity* (plastisitas tinggi, LL > 50)

Tabel klasifikasi tanah berdasarkan sistem *unified* menurut USCS, ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sistem klasifikasi U*nified*

Jenis	Simbol	Nama Kelompok	Kriteria Klasifikasi		
Kerikil 50 % atau lebih dan fraksi kasar tertahan saringan no. 4	GW	Kerikil gradasi baik. Sedikit atau tidak mengandung fraksi halus	$F_{200} < 5\%$ $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ dan $1 < Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$		Tanah memiliki simbol ganda jika $5\% \le F_{200} \le 12\ \%$, yaitu a. GW – GM, jika $Cc > 4$, $1 < Cu < 3$, PI , 4 % b. GW – GM, jika $Cc > 4$, $1 < Cu < 3$, PI , 7 % c. GP – GM, jika tidak memenuhi kriteria GW dan PI < 4 % d. GP – GC, jika tidak memenuhi kriteria GW dan PI < 7 %
	GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, sedikit atau tidak mengandung fraksi halus	$F_{200}<5\%$ Cu dan Cc tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW		
	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil - pasir - lanau	$F_{200}>12\%$ dan PI < 4 % (berada di bawah garis – A)	Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol ganda, GM - GC	
	GC	Kerikil berlempung campuran kerikil - pasir - lempung	$F_{200}>12\%$ dan PI > 7 % (berada di bawah garis – A)		
Pasir lebih dari 50 % fraksi kasar lolos saringan No. 4	SW	Pasir gradasi baik, berkerikil, sedikit atau tidak mengandung fraksi halus	$F_{200} < 5\%$ $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ dan $1 < Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$		Tanah memiliki simbol ganda jika $5\% \le F_{200} \le 12\ \%$, yaitu a. SW – SM, jika $Cc > 4$, $1 < Cu < 3$, PI , 4 % b. SW – SM, jika $Cc > 4$, $1 < Cu < 3$, PI , 7 % c. SP – SM, jika tidak memenuhi kriteria SW dan PI < 4 % d. SP – SC, jika tidak memenuhi kriteria SW dan PI < 7 %
	SP	Pasir gradasi buruk, berkerikil, sedikit atau tidak mengandung fraksi halus	$F_{200}<5\%$ Cu dan Cc tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW		
	SM	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau	$F_{200}>12\%$ dan PI < 4 % (berada di bawah garis – A)	Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol ganda, SM - SC	
	SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung	$F_{200}>12\%$ dan PI > 7 % (berada di bawah garis – A)		

2.3 Pemadatan Tanah (*Proctor Standar*)

Pemadatan merupakan usaha untuk mempertinggi kerapatan tanah, yaitu dengan mengeluarkan udara pada pori-pori tanah yang biasanya menggunakan energi mekanis. Pemadatan di lapangan biasanya dihubungkan dengan jumlah gilasan dari mesin gilas, atau hal lain yang prinsipnya sama untuk suatu volume tanah tertentu. Sedangkan untuk pemadatan di laboratorium menggunakan pengujian standar yang disebut uji proctor, dengan cara menjatuhkan suatu penumbuk khusus pada beberapa lapis tanah di dalam sebuah mold dari ketinggian tertentu. Dengan melakukan pengujian pemadatan tanah ini, akan menghasilkan hubungan antara kadar air dengan berat volume kering.

Tujuan pemadatan adalah untuk memadatkan tanah dalam keadaan kadar air oprimum, sehingga udara dalam pori-pori tanah akan keluar.

Beberapa keuntungan yang didapatkan dengan adanya pemadatan ini adalah:

a. Menaikkan kekuatan tanah.
b. Memperkecil pengaruh air terhadap tanah.
c. Berkurangnya penurunan permukaan, yaitu gerakan vertikal di dalam massa tanah itu sendiri akibat berkurangnya angka pori.
d. Mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air.

Derajat kepadatan tanah ditentukan dari hubungan berat volume kering (γ_d), berat volume basah (γ), dan kadar air (w) yang dinyatakan dengan persamaan:

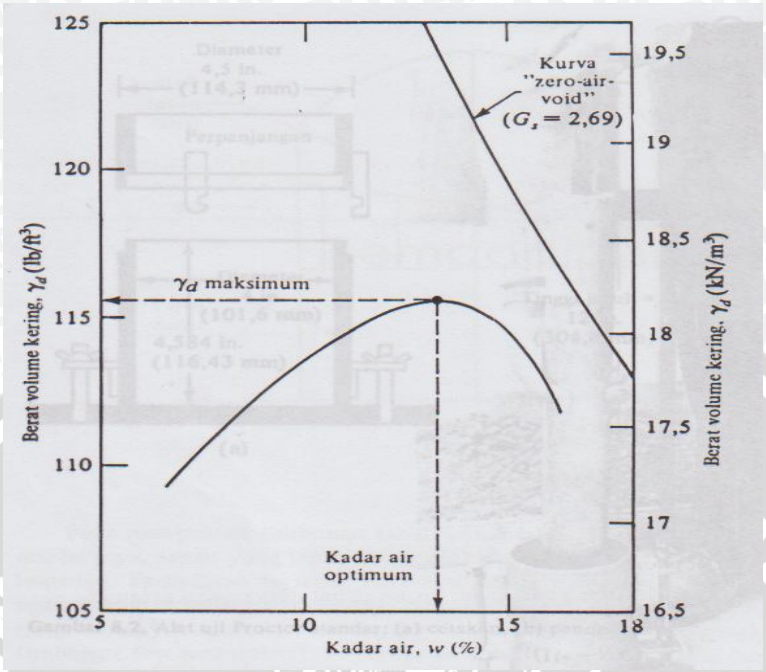
——— (2-1)

2.4 Penentuan Kadar Air Optimum

Untuk mengetahui kadar air yang optimum pada tanah, maka dilakukan pengujian pemadatan proctor standar. Pengujian tersebut dilakukan dengan pemadatan sampel tanah basah (pada kadar air terkontrol) dalam suatu cetakan yang dibagi dalam 3 lapisan. Setiap lapisan dipadatkan dengan 25 tumbukan yang mengguakan penumbuk khusus dengan massa 2,5 kg dan tinggi jatuh 30,5 cm.

Kadar air dimana harga berat volume kering maksimum tanah dicapai disebut kadar air optimum. Kadar air optimum dapat ditentukan dengan membuat kurva hubungan antara kadar air (w) sebagai absis dan berat volume tanah kering (γ_d) sebagai ordinat, puncak kurva sebagai nilai $\gamma_{d(maks)}$. Kurva yang digunakan adalah kurva dari uji pemadatan tanah (proctor standar). Dari titik puncak ditarik garis vertikal memotong

absis, pada titik ini adalah kadar air optimum. Contoh kurva hubungan antara berat volume kering dan kadar air dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kurva hubungan berat volume kering dengan kadar air
Sumber: Braja M. Das (1985:238)

2.5 Lereng

Lereng adalah kenampakan permukaan alam dengan suatu beda tinggi. Apabila beda tinggi dua tempat tersebut dibandingkan dengan jarak lurus mendatar, akan diperoleh besarnya kelerengan (*slope*). Bentuk lereng tergantung pada proses erosi, gerakan tanah, dan pelapukan. Lereng merupakan parameter topografi yang terbagi dalam dua bagian, yaitu kemiringan lereng dan beda tinggi relief. (Bowles & Joseph E., 2001)

Adapun jenis lereng yang sering dijumpai antara lain :

a. Lereng alami, yaitu lereng yang terbentuk karena proses geologi, misalnya lereng suatu bukit.
b. Lereng buatan ada 2 tipe :
   - Lereng buatan tanah asli, yaitu lereng yang dibuat dari tanah asli dengan memotong tanah tersebut untuk pembuatan jalan atau saluran air untuk irigasi, atau biasa disebut juga sebagai *cut slopes.*

- Lereng buatan tanah yang dipadatkan, yaitu lereng yang terbentuk dari tanah yang dipadatkan untuk tanggul-tanggul jalan raya atau bendungan urugan tanah, atau biasa disebut juga sebagai *fill slopes.*

Sedangkan dalam analisis dapat dibedakan menjadi :

c. Lereng tak terbatas (*infinite slopes*) atau lereng yang dapat dianggap tidak terbatas ketinggiannya.
d. Lereng terbatas (*finite slopes*) atau lereng dengan tinggi yang terbatas.

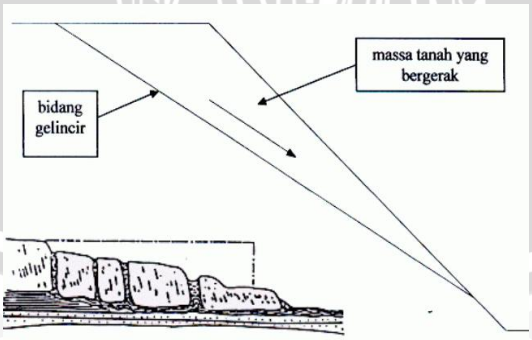
2.6 Kelongsoran Tanah

Tanah longsor didefinisikan sebagai tanah tanah longsor batuan atau tanah di atas lereng permukaan ke arah bawah lereng bumi yang disebabkan oleh gravitasi atau gaya berat. Material berupa tanah atau campuran tanah dan rombakan batuan akan bergerak ke arah bawah lereng dengan cara air meresap ke dalam celah pori batuan atau tanah, sehingga menambah beban material permukaan lereng dan menekan material tanah dan bongkah-bongkah perombakan batuan. Selanjutnya hal itu memicunya lepas dan bergeraknya material bersama-sama dengan air.

Berikut ini dijelaskan nama-nama kelas gerakan tanah yang umum dipakai:

a. Tanah longsor tipe translasi

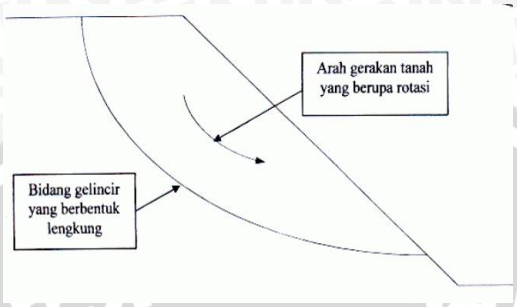
Longsoran translasi adalah bergeraknya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk rata atau menggelombang landai. Kelongsoran tipe ini cenderung terjadi bila lapisan tanah yang mempunyai kekuatan geser berbeda pada kedalaman yang relatif dangkal di bawah permukaan lereng. Longsoran tipe translasi ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Tanah longsor tipe translasi

b. Tanah longsor tipe rotasi

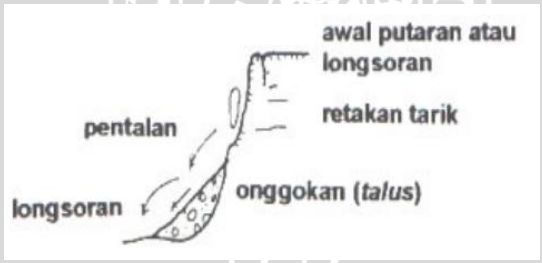
Longsoran rotasi yaitu bergeraknya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk cekung. Pada kondisi tanah homogen, longsoran rotasi ini dapat berupa busur lingkaran, tetapi dalam kenyataan sering dipengaruhi oleh adanya diskontinuitas oleh adanya sesar, lapisan dan lain-lain. Longsoran tipe rotasi ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tanah longsor tipe rotasi

c. Tanah longsor tipe jatuhan *(falls)*

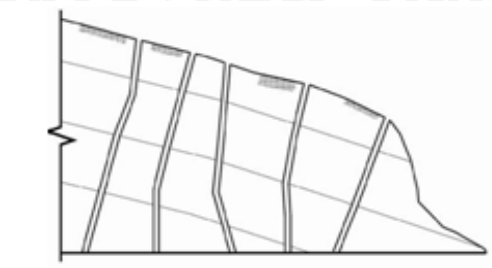
Sejumlah massa tanah yang jatuh terlepas dari lereng yang curam dan tidak ada gaya yang menahan pada saat geseran dengan material yang berbatasan. Proses tanah longsor semacam ini umumnya terjadi pada lereng yang terjal, bisa dalam bentuk bongkah individual batuan berukuran besar atau dalam bentuk gugusan fragmen bongkah bercampur dengan bongkah-bongkah yang berukuran lebih kecil. Longsoran tipe jatuhan ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Tanah longsor tipe jatuhan

d. Tanah longsor tipe robohan (*topples*)

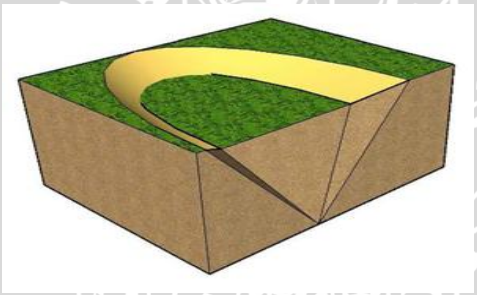
Gerakan massa tipe robohan hampir serupa dengan tanah longsor tipe *falls*, pada tipe *topples* ini gerakannya dimulai dengan bagian paling atas dari bongkah lepas dari batuan induknya karena adanya celah retakan pemisah, bongkah terdorong ke depan hingga tidak dapat menahan bebannya sendiri. Longsoran tipe robohan ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Tanah longsor tipe robohan

e. Tanah longsor tipe gelincir *(slides)*

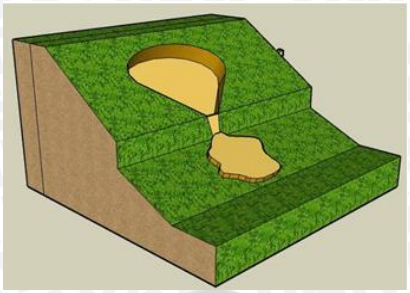
Tanah longsor tipe gelincir adalah tanah longsor batuan atau tanah atau campuran keduanya yang bergerak melalui bidang gelincir tertentu yang bertindak sebagai bidang diskontinuitas, berupa bidang perlapisan batuan atau bidang sesar/patahan, bidang kekar, bidang batas pelapukan. Jika bidang-bidang diskontinuitas tersebut sejajar dengan bidang perlapisan, maka semakin besar peluang terjadinya tanah longsor. Longsoran tipe gelincir ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Tanah longsor tipe gelincir

f. Tanah longsor tipe aliran *(flows)*

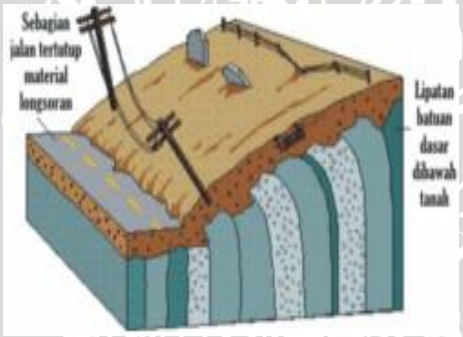
Tanah longsor tipe aliran adalah tanah atau bercampur dengan bongkah-bongkah batuan bergerak pada saluran tertentu yang disebabkan massa tanah yang kehilangan daya rekatnya karena penjenuhan oleh air meresap ke dalam tanah sangat banyak karena intensitas hujan yang sangat tinggi dan lama atau pencairan gletser di daerah yang beriklim dingin. Bidang longsor antara material yang bergerak umumnya tidak dapat dikenali. Longsoran tipe aliran ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Tanah longsor tipe aliran

g. Tanah longsor tipe rayapan *(creep)*

Gerakan tipe tanah rayapan adalah tanah longsor yang bergerak sangat lambat, gerakannya tidak spontan (tidak mendadak). Jenis tanah longsor ini hampir tidak dapat dikenali. Setelah waktu yang cukup lama, longsor jenis rayapan ini dapat menyebabkan tiang-tiang telepon, pohon, atau rumah miring ke bawah. Longsoran tipe rayapan ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Tanah longsor tipe rayapan

2.7 Analisis Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng bertujuan untuk mendapatkan angka faktor keamanan dari suatu bentuk lereng tertentu. Dengan diketahuinya faktor keamanan akan memudahkan pekerjaan pembentukan lereng untuk memastikan apakah lereng yang telah terbentuk mempunyai resiko longsor atau cukup stabil. Analisis stabilitas lereng harus berdasarkan atas model yang akurat mengenai material tanah, kondisi air tanah dan pembebanan yang mungkin terjadi pada lereng yang sebenarnya. Bertambahnya tingkat kepastian untuk memprediksi ancaman longsor dapat bermanfaat untuk hal-hal sebagai berikut:

a. Untuk memahami perkembangan dan bentuk dari lereng alam dan proses yang menyebabkan terjadinya bentuk-bentuk alam yang berbeda.
b. Untuk menilai kestabilan lereng dalam jangka pendek (selama konstruksi) dan juga kondisi jangka panjang.
c. Untuk menilai kemungkinan terjadinya kelongsoran yang melibatkan lereng alam atau lereng buatan.
d. Untuk menganalisa kelongsoran dan untuk memahami kesalahan mekanisme dan pengaruh dari faktor lingkungan.
e. Untuk dapat mendesain ulang lereng yang gagal serta perencanaan dan desain pencegahannya serta pengukuran ulang.
f. Untuk mempelajari efek atau pengaruh dari beban luar pada lereng.

Dalam analisis stabilitas lereng, dibuat beberapa anggapan sebagai berikut (Hary Christady, 2002) :

a. Kelongsoran lereng terjadi di sepanjang permukaan bidang longsor tertentu dan dapat dianggap sebagai masalah bidang dua dimensi.
b. Massa tanah yang longsor dianggap sebagai benda masif.
c. Tahanan geser dari massa tanah pada setiap titik sepanjang bidang longsor tidak tergantung dari orientasi permukaan longsor, atau dengan kata lain kuat geser tanah dianggap isotropis.
d. Faktor keamanan didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor yang potensial dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsoran.

Gangguan pada stabilitas lereng dapat mengakibatkan kelongsoran. Kelongsoran lereng alam ini dapat terjadi dari hal-hal sebagai berikut (Hary Christady Hardiyatmo, 2002) :

a. Penambahan beban pada lereng. Tambahan beban lereng dapat berupa bangunan baru, tambahan beban oleh air yang masuk ke pori-pori tanah maupun yang menggenang di permukaan tanah, timbunan tanah dan beban- beban dinamis oleh tumbuh-tumbuhan yang tertiup angin dan lain-lain.
b. Penggalian atau pemotongan tanah pada kaki lereng.
c. Penggalian yang mempertajam kemiringan lereng.
d. Perubahan posisi muka air secara cepat (*rapid drawdown*) pada bendungan, sungai dan lain-lain.

e. Kenaikan tekanan lateral oleh air (air yang mengisi retakan akan mendorong tanah ke lateral).
f. Gempa bumi. Hal ini disebabkan oleh rambatan gelombang yang melewati berbagai lapisan sebelum mencapai permukaan tanah, sehingga menimbulkan perubahan pada sistem tegangan semula.
g. Penurunan tahanan geser tanah pembentuk lereng akibat kenaikan kadar air, kenaikan tekanan air pori, tekanan rembesan oleh genangan air di dalam tanah, tanah pada lereng mengandung lempung yang mudah kembang susut, dan lain-lain.

Penanggulangan longsor dapat ditempuh dengan berbagai cara, antara lain (Djatmiko Soedarmo, 1997) :

a. Pengurangan beban. Hal ini dapat dilakukan dengan mengurangi ketinggian lereng dengan penggalian pada puncak.
b. Peningkatan kuat geser tanah dengan mengurangi ekses tekanan air pori. Hal ini dilakukan melalui pengaturan drainase horizontal dan vertikal berdiameter kecil dan pembuatan sumur yang diisi pasir dan kerikil.
c. Peningkatan gaya penahan. Pekerjaan ini dilakukan dengan penggalian massa yang labil dengan tanah yang dipadatkan dan diatur bertangga, peningkatan beban lawan / *counterweight* pada lereng bawah dilengkapi drainase.
d. Perkuatan lereng secara struktural. Dalam hal ini dibuat dinding penahan tanah dengan atau tanpa kantilever. Tiang bor/pancang atau *piles* mencapai lapisan tanah yang keras/stabil. Pemberian jangkar tanah sampai lapisan tanah/batu yang stabil.
e. Teknik khusus yang meliputi *grouting*, geogrid dan lain-lain.

2.7.1 Tipe Keruntuhan Lereng

Berdasarkan penelitian terdahulu tentang keruntuhan lereng, diketahui bahwa bidang keruntuhan lereng menyerupai bentuk busur lingkaran. Tipe keruntuhan lereng yang normal terjadi dapat dibagi atas :

a. Keruntuhan pada lereng (*slope failure*)

   Keruntuhan ini terjadi karena sudut lereng sangat besar dan tanah yang dekat dengan kaki lereng tersebut memiliki kekuatan yang tinggi.

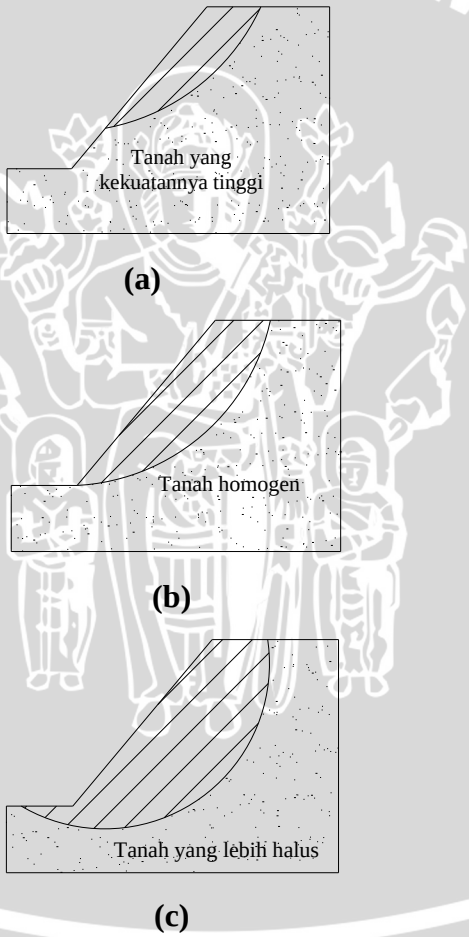
b. Keruntuhan pada kaki lereng (*toe failure*)

Keruntuhan ini terjadi ketika tanah yang berada di atas dan di bawah kaki lereng bersifat homogen.

c. Keruntuhan di bawah kaki lereng (*base failure*)

Keruntuhan ini terutama diakibatkan sudut lereng yang kecil dan tanah yang berada di bawah kaki lereng lebih halus dan lebih plastis daripada tanah di atasnya.

Adapun tipe keruntuhan lereng dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 (a)Tipe keruntuhan pada lereng; (b) Tipe keruntuhan pada kaki lereng; (c) Tipe keruntuhan pada dasar lereng

2.7.2 Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan (Metode *Limit Equilibrium*)

Ukuran stabilitas lereng biasanya dinyatakan dalam istilah faktor keamanan (*safety factor*). Fungsi dari faktor keamanan adalah untuk memastikan apakah lereng yang telah dibentuk mempunyai resiko longsor atau cukup stabil. Faktor keamanan adalah nilai bidang antara gaya yang menahan longsor dan gaya yang menyebabkan kelongsoran atau dapat dinotasikan dalam Persamaan (2-2).

— (2-2)

Dengan :

τ adalah tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah

τ_d adalah tegangan geser yang bekerja sepanjang bidang longsor

F adalah angka keamanan terhadap kekuatan tanah

Menurut teori Mohr-Coulomb, kekuatan geser tanah terdiri dari dua komponen, yaitu kohesi dan geseran, sehingga didapatkan Persamaan (2-3).

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2\text{-}3)$$

Dengan :

c = kohesi; ϕ = sudut geser tanah; σ = tegangan normal pada permukaan bidang longsor.

Dengan cara yang sama, dapat dituliskan Persamaan (2-4) tentang tegangan geser yang terjadi (τ_d) akibat beban tanah dan beban-beban lain pada bidang longsornya.

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d \quad (2\text{-}4)$$

dengan c_d dan ϕ_d adalah kohesi dan sudut geser dalam yang terjadi atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang longsornya.

Subsitusikan Persamaan (2-3) dan (2-4) ke Persamaan (2-2) diperoleh persamaan faktor aman seperti ditunjukkan Persamaan (2-5).

——— (2-5)

Aspek lain dari angka keamanan yaitu angka keamanan kohesi dan angka keamanan sudut geser yang dituliskan pada Persamaan (2-6a) dan (2-6b).

— (2-6a)

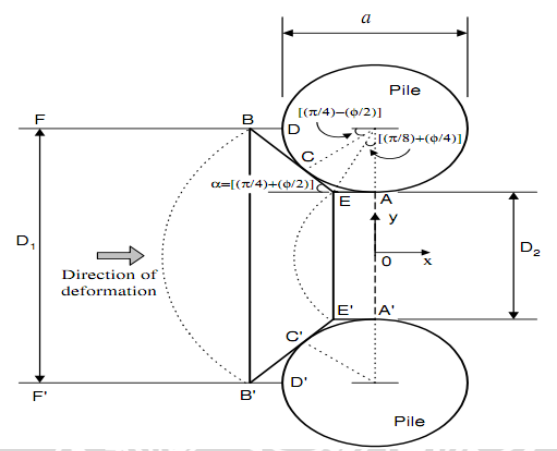
(2-6b)

dengan F_c = faktor aman terhadap kohesi dan F_ϕ = faktor aman terhadap sudut geser.

2.7.3 Metode Analisis Tekanan Tanah Pada Kondisi Batas

Saat ini terdapat beberapa metode untuk menganalisis besar tekanan tanah yang bekerja pada lereng yang diperkuat oleh *pile*. Salah satu metode berbasis teoritik yang diperkenalkan oleh Ito dan Matsui (1975) dan De Beer dan Carpentier (1977).

a. Metode Teoritis Ito dan Matsui (1975)



Gambar 2.10 Kondisi plastis di sekitar *pile*

Ito dan Matsui (1975) adalah yang pertama kali memprediksi tekanan tanah pada kondisi batas untuk lereng yang diperkuat *pile* dalam baris berdasarkan pada teori deformasi plastis. Metode tersebut memprediksi besarnya tekanan pada tanah mencapai keseimbangan plastis berdasarkan pada kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Asumsi-asumsi pada metode Ito dan Matsui (1975):

a. Tanah berperilaku plastis pada daerah AEBB´E´A´ di sekeliling *pile* seperti ditunjukkan di Gambar 2.10.
b. Tidak terjadi geseran pada permukaan EB dan E´B´. Oleh karena itu tegangan pada gaya antar muka antara *pile* dengan tanah dipandang sebagai tegangan prinsipal.
c. Kondisi regangan bidang terjadi pada arah kedalaman.
d. Permukaan keruntuhan geser terjadi sepanjang keliling *pile* bagian dalam.
e. *Pile* adalah elemen yang kaku dibandingkan elemen tanah dalam arah vertikal.
f. Jika gaya geser bekerja pada permukaan AEB dan A´E´B´, distribusi tegangan tanah pada AEBB´E´A´ selalu sama dan jika tidak terjadi gaya geser permukaan.

g. Gaya horizontal lateral permukaan berada di belakang dan di depan baris *pile*.

Asumsi yang lain dan penjelasan yang lebih detail untuk persamaan analisis *pile* telah diuraikan oleh Ito dan Matsui (Ito dan Matsui 1975,1978) dalam Persamaan (2-7).

(2-7)

Dengan :

D_1 = jarak pusat ke pusat antar *pile*

D_2 = jarak antar *pile* bagian dalam

Ø = sudut geser dalam tanah

γ = berat isi tanah

z = kedalaman dari permukaan tanah

Meskipun Persamaan (2-7) sesuai untuk *pile* yang kaku tapi persamaan tersebut juga dapat digunakan pada persamaan untuk *pile* yang elastis. Karena menurut asumsi, pada tanah di sekitar *pile* mengalami deformasi yang kecil sehingga efeknya pada deformasi *pile* dapat diabaikan.

Untuk jenis tanah pasir (*sand*), gaya lateral dapat diestimasi dengan menentukan c = 0 pada Persamaan (2-7), maka dapat dituliskan menjadi Persamaan (2-8).

(2-8)

b. Metode De Beer dan Carpentier (1977)

De Beer dan Carpentier (1977) dalam Seyhan Firat (2009), mengembangkan perbandingan dari persamaan Ito dan Matsui (1975), persamaan tekanan tanah per satuan kedalaman pada kondisi batas seperti ditunjukkan pada Persamaan (2-9).

(2-9)

dengan:

(2-10)

(2-11)

D_1 adalah jarak inteval *pile* (dari pusat *pile*), D_2 adalah jarak spasi antar *pile*, c adalah kohesi tanah, Ø adalah sudut geser tanah, γ adalah berat jenis tanah, z adalah kedalaman *pile* dari permukaan tanah.

Untuk jenis tanah pasir (*sand*), gaya lateral per satuan kedalaman dapat diestimasi dengan menentukan c = 0 pada Persamaan (2-9) maka dapat dituliskan menjadi Persamaan (2-12).

(2-12)

2.8 Stabilitas Lereng Menggunakan Perkuatan *Pile*

Penggunaan *pile* menjadi salah satu teknik perkuatan lereng yang sering digunakan dalam beberapa tahun belakangan ini. Beberapa penggunaannya yang berhasil dilaporkan oleh De Beer (1970), Ito dan Matsui (1975), Sommer (1977), Fukuoka (1977) dan Wang (1979). *Pile* yang digunakan dibebani dengan gaya lateral oleh perpindahan horisontal tanah di sekitarnya dan karena itu *pile* tersebut dianggap sebagai *pile* pasif. Penelitian terdahulu menyatakan bahwa kelongsoran lereng dapat distabilkan dengan meningkatkan faktor keamanan.

2.8.1 Reaksi *Pile*

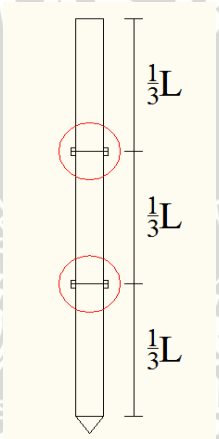
Analisis stabilitas *pile* berguna untuk mengetahui reaksi dan gaya-gaya yang bekerja pada *pile* saat diberi pembebanan. Variabel yang digunakan untuk mengetahui reaksi *pile* adalah dengan mengetahui regangan yang terjadi pada *pile*. Regangan yang terjadi dapat dibaca dari nilai *strain gauge* yang dipasang pada *pile*. Sedangkan untuk mengetahui pergerakan *pile*, digunakan LVDT.

Melalui pembacaan *strain gauge*, dapat dilihat reaksi *pile* terhadap beban lateral yang dihasilkan oleh tanah. Dari hasil pembacaan itu, dapat dihitung besarnya gaya geser yang bekerja pada *pile* dan momen pada *pile*. Variabel yang didapatkan dari

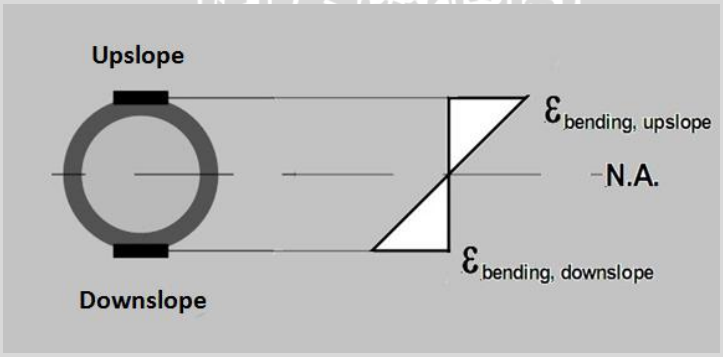
pembacaan *strain gauge* adalah variabel regangan (ε) yang kemudian diolah untuk mendapatkan besarnya momen pada *pile*.

a. Perhitungan regangan

Dalam penelitian lereng dengan perkuatan *pile*, digunakan *strain gauge* untuk menghitung nilai regangan pada *pile* yang terjadi pada setiap variasi. *Strain gauge* dipasang di setiap sepertiga panjang *pile* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11. Adapun pemasangan *strain gauge* pada *pile* tampak atas dapat ditunjukkan pada Gambar 2.12. Perhitungan nilai regangan dari pembacaan *strain gauge* dapat diolah untuk menghitung momen yang bekerja pada *pile*.



Gambar 2.11 Lokasi penempatan *strain gauge* tampak samping

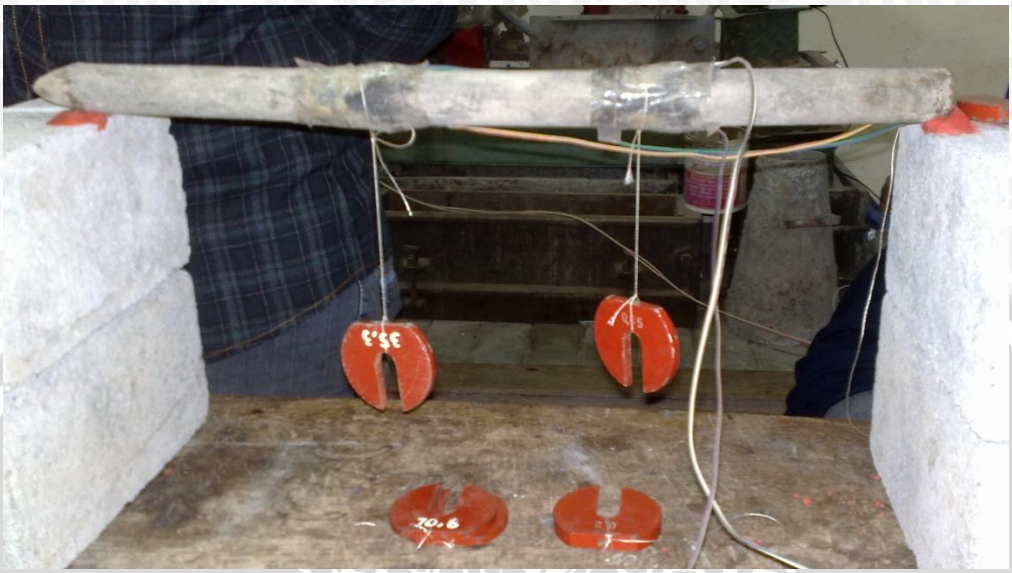


Gambar 2.12 Lokasi penempatan *strain gauge* tampak atas

b. Perhitungan *bending moment*

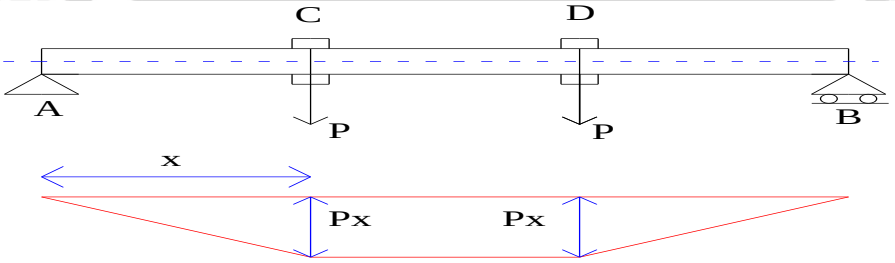
Salah satu metode perhitungan nilai *bending moment* yaitu dengan berdasarkan pada kalibrasi *strain gauge* yang terlebih dahulu dilakukan. Kalibrasi *strain gauge* didapatkan dengan melakukan *four point bending test*. Pada *four point bending test*, *strain gauge* dipasang pada *pile* dan dilakukan uji pembebanan dengan memasang

beban yang bervariasi pada 2 titik sehingga membagi *pile* menjadi 3 bagian seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13. Dengan melakukan uji pembebanan tersebut, dapat digambarkan diagram kalibrasi antara nilai *bending moment* dengan regangan yang terbaca. Selanjutnya, nilai *bending moment* saat pengujian pembebanan lereng dapat ditentukan dengan melihat grafik kalibrasi berdasarkan regangan yang terbaca.



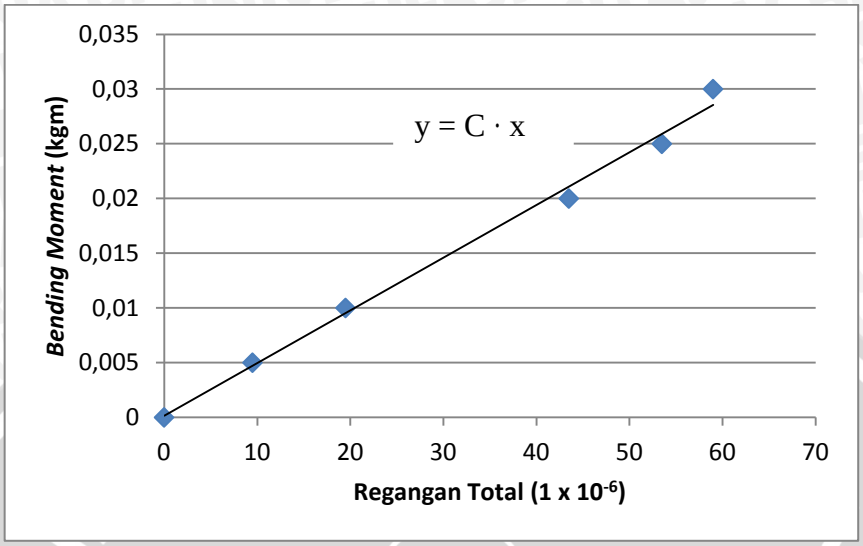
Gambar 2.13 Kalibrasi *strain gauge* menggunakan *four-point bending test*

Untuk mengukur besarnya *bending moment* yang terjadi pada *pile*, terlebih dahulu harus dilakukan proses kalibrasi nilai *strain gauge*. Pada proses kalibrasi ini, digunakan *pile* dengan panjang 40 cm dan diameter 1,27 cm, 1,905 cm, 2,54 cm, dan 3,175 cm. Kalibrasi dilakukan dengan memasang *strain gauge* pada tiap sepertiga panjang *pile* secara berhadapan (posisi atas dan bawah). Setelah itu, dilakukan pemasangan beban pada lokasi yang sama, yaitu di tiap sepertiga panjang *pile* tersebut. Digunakan 5 jenis beban untuk mengetahui bagaimana regangan pada tiap peningkatan beban. Adapun besarnya momen dapat dihitung menggunakan perhitungan statika tertentu dengan mengasumsikan *pile* merupakan balok sederhana yang ditumpu di tiap ujungnya seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Grafik *bending moment* menggunakan *four point bending test*

Setelah pengujian dilakukan, maka akan didapat grafik hubungan antara *bending moment* dan regangan, seperti pada Gambar 2.15. Berdasarkan grafik hubungan tersebut, maka didapatkan persamaan untuk menganalisis nilai *bending moment*.



Gambar 2.15 Grafik hubungan *bending moment* dan regangan *pile*

Nilai kalibrasi didapatkan dari persamaan regresi linear dari grafik hubungan antara gaya momen dan regangan. Pada pengujian, besarnya *bending moment* akibat gaya lateral dapat dicari menggunakan Persamaan (2-13).

$$\text{Momen} = C \cdot \varepsilon \qquad (2\text{-}13)$$

Keterangan :

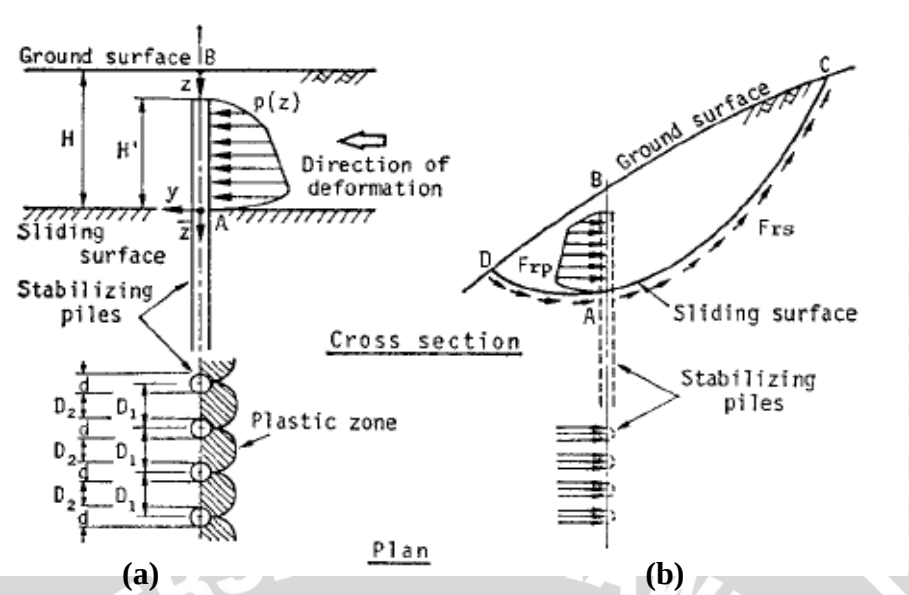
Momen = *Bending moment* pada kedalaman *pile*

C = konstanta kalibrasi *strain gauge*

ε = regangan yang terukur dari *strain gauge*

2.8.2 Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan *Pile*

Ketika faktor keamanan lereng dipertimbangkan menjadi tidak mencukupi, stabilitas lereng dapat ditingkatkan dengan memasang struktur penahan seperti sebaris *pile*. *Pile* harus didesain untuk dapat menghasilkan gaya stabilisasi yang dibutuhkan untuk meningkatkan faktor keamanan yang dibutuhkan.



Gambar 2.16 Pengaruh stabilitas *pile* terhadap stabilitas lereng
(a) *Pile stability*; (b) *Slope stability*

Seperti terdapat pada Gambar 2.16, diameter *pile* (d) diletakkan dalam satu baris dengan jarak (D_1) melalui tanah berdeformasi plastis. Ketika deformasi lateral terjadi pada tebal lapisan tanah (H) dengan arah tegak lurus terhadap arah satu baris *pile*, gaya lateral bekerja pada *pile* sebagai hubungan antara *pile* dengan lapisan tanah. Pada analisis, hal tersebut cukup untuk menghubungkan dengan perilaku lapisan tanah antara dua *pile*, yang ditunjukkan pada Gambar 2.16.

Analisis stabilitas lereng dapat dihasilkan dengan membuat perbandingan antara gaya tahanan dengan gaya pendorong, F_r dan F_d, yang bekerja pada massa tanah CADBC di atas permukaan longsor seperti pada Gambar 2.16. Gaya tahanan F_r diperoleh sebagai hasil pertambahan antara gaya tahanan pada lereng F_{rs} dan gaya tahanan pada lereng F_{rp}, dalam kaitan dengan tahanan geser sepanjang bidang permukaan longsor CAD dan gaya reaksi satu baris *pile* pada bidang AB, berturut-turut. Tahanan geser sepanjang permukaan longsor AD dianggap sebagai bagian dari gaya tahanan F_r, karena massa tanah pada kedua sisi dari letak sebaris *pile*. Dengan kata lain ABCA dan ABDA pada Gambar 2.16 akan berubah bentuk sebagai satu bagian pada area di antara *pile*, sementara hanya tanah yang mengelilingi sebaris *pile* akan mencapai keadaan plastis.

Dengan demikian, faktor keamanan lereng $(F_s)_{slope}$ pada stabilitas lereng dengan menggunakan tahanan *pile*, didapat dari Persamaan (2-14).

$$(F_s)_{slope} = \frac{\quad}{\quad} \qquad (2\text{-}14)$$

Nilai F_{rs} dan F_d dapat diperoleh dengan menggunakan salah satu metode irisan pada stabilitas lereng. Sementara itu, F_{rp} dapat diperoleh dengan membagi gaya reaksi *pile* dengan jarak dari pusat ke pusat D_1 di antara sebaris *pile*. Dalam kasus dimana kegagalan geser *pile* terjadi, maka F_{rp} didapatkan dari tahanan geser *pile* pada permukaan longsor. Jika faktor keamanan pada persamaan di atas lebih besar dari nilai yang diinginkan, maka stabilitas lereng tidak dapat menahan.

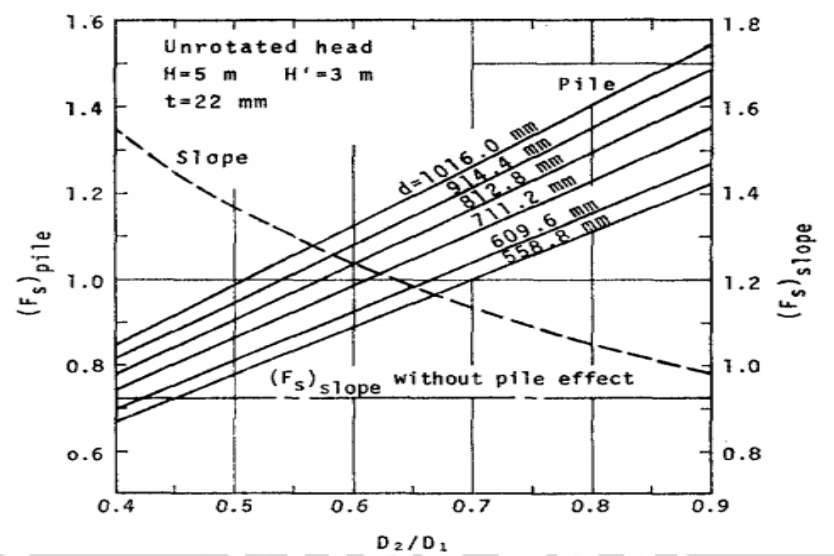
Ito dan Matsui (1975) dan Ito et al. (1979,1982) telah mengembangkan analisis sebelumnya untuk menunjukkan bahwa *pile* menahan deformasi plastis tanah seperti gerakan massa tanah atau kelongsoran, sehingga deformasi plastis tersebut dapat dicegah. Teori yang dikemukakan Ito dan Matsui disebut dengan teori deformasi plastis, yang mengukur gaya lateral yang melewati dua *pile* dan pergerakan massa tanah atau kelongsoran.

2.8.3 Pengaruh Perkuatan *Pile* Terhadap Stabilitas Lereng

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, stabilitas lereng dengan perkuatan *pile* dapat dianalisis menggunakan metode *pile stability* dan *slope stability* (Ito dan Matsui, 1975). Sehingga dapat dikatakan bahwa *pile* mempunyai peranan penting untuk melawan gerakan longsoran tanah. Oleh karena itu, ada beberapa hal dari *pile* yang perlu dipelajari lebih lanjut, antara lain panjang, diameter, jarak antar *pile*, dan letak *pile* pada lereng. Berikut ini akan dibahas lebih lanjut mengenai pengaruh diameter dan jarak antar *pile* terhadap stabilitas lereng sesuai dengan tujuan penelitian ini.

a. Pengaruh diameter *pile*

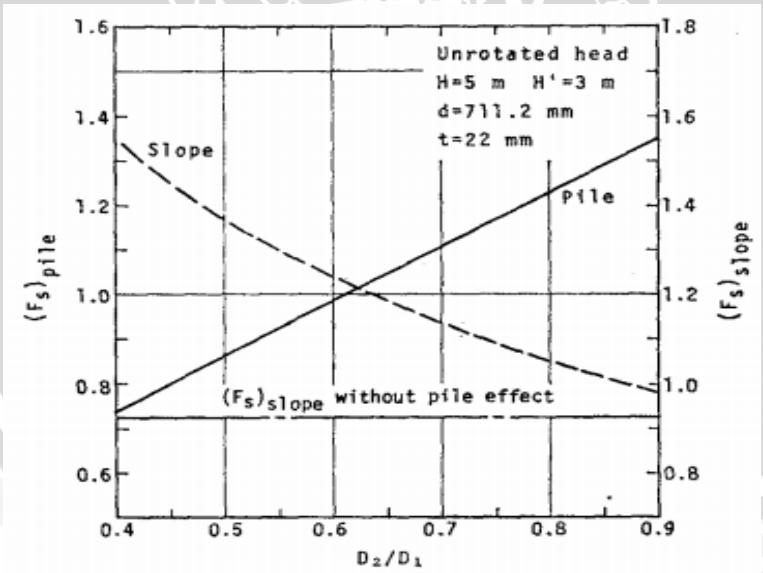
Diameter *pile* merupakan salah satu parameter variabel yang mempengaruhi analisis stabilitas lereng. Dari penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Ito dan Matsui (1975), diperoleh kesimpulan bahwa angka keamanan pada stabilitas lereng meningkat seiring dengan bertambahnya diameter *pile* yang digunakan. Hubungan antara angka keamanan stabilitas lereng dengan diameter tidak berdiri sendiri, tetapi juga dipengaruhi oleh rasio jarak D_2/D_1 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17, dimana D_2 adalah jarak tepi ke tepi *pile* dan D_1 adalah jarak antar pusat *pile*. Hal ini diperoleh dari fakta bahwa persamaan tegangan lateral p(z) seperti pada persamaan *(2.7)* dan *(2.9)* merupakan fungsi dari rasio jarak D_2/D_1.



Gambar 2.17 Grafik pengaruh diameter *pile* terhadap stabilitas lereng

b. Pengaruh jarak antar *pile*

Menurut Ito dan Matsui (1975), jarak antar *pile* merupakan salah satu faktor yang dapat meningkatkan stabilitas lereng. Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara angka keamanan pada stabilitas lereng dan *pile* dengan jarak antar *pile*, yang diwakili oleh interval jarak D_2/D_1. Hubungan ini ditunjukkan pada Gambar 2.18 berikut ini.



Gambar 2.18 Grafik hubungan antara angka keamanan $(F_s)_{pile}$ dan $(F_s)_{slope}$ dengan rasio jarak D_2/D_1

Dari gambar tersebut, terlihat bahwa jarak antar *pile* berpengaruh besar untuk melawan kelongsoran, karena meningkatnya angka keamanan dari *pile-stability* dengan semakin bertambahnya interval jarak D_2/D_1. Sementara itu, meningkatnya interval jarak akan menyebabkan *slope-stability* menurun. Hal ini ditimbulkan dari fakta bahwa tegangan lateral yang bekerja pada *pile* (atau reaksi dari gaya lateral) akan berkurang dengan semakin meningkatnya jarak antar *pile*.

Berdasarkan pada teori penurunan plastis yang dikemukakan oleh Ito dan Matsui (1975) dan De Beer dan Carpentier (1977), tegangan lateral pada *pile* akan menjadi tak terhingga saat $D_2 = 0$, yang berarti tidak ada jarak antar *pile*. Padahal pada kenyataannya tidak sesuai, karena tegangan yang dihasilkan oleh *pile* tidak dapat lebih besar dari yang dibutuhkan pada keseimbangan massa tanah yang terletak pada baris *pile*. Oleh karena itu, diusulkan agar jarak antara dua *pile* (D_2) minimal adalah dua per tiga dari diameter *pile* yang digunakan.

2.9 PLAXIS

PLAXIS mulai dikembangkan sekitar tahun 1987 di Technical University of Delft atas inisiatif dari Dutch Departement of Public Works and Water Management. PLAXIS adalah program elemen hingga untuk aplikasi geoteknik dimana digunakan model-model tanah untuk melakukan simulasi terhadap perilaku dari tanah. Program PLAXIS dan model-model tanah di dalamnya telah dikembangkan dengan seksama. Walaupun pengujian dan validasi telah banyak dilakukan, tetap tidak dapat dijamin bahwa program PLAXIS bebas dari kesalahan. Akurasi dari keadaan sebenarnya yang diperkirakan sangat bergantung pada keahlian dari pengguna terhadap pemodelan permasalahan, pemahaman terhadap model-model tanah serta keterbatasannya, penentuan parameter-parameter model, dan kemampuan untuk melakukan interpretasi dari hasil komputasi.

2.9.1 Faktor Keamanan (PLAXIS)

Faktor keamanan umumnya didefinisikan sebagai perbandingan dari beban runtuh terhadap beban kerja. Definisi ini lebih tepat untuk pondasi, tetapi tidak tepat untuk turap maupun timbunan. Untuk struktur-struktur semacam ini, akan lebih tepat untuk menggunakan definisi faktor keamanan dalam mekanika tanah, yaitu perbandingan antara kuat geser yang tersedia terhadap kuat geser yang dibutuhkan

untuk mencapai keseimbangan. PLAXIS dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan ini dengan prosedur "Reduksi phi-c".

2.9.2 Model Mohr - Coulomb

Model Mohr - Coulomb adalah model elastis - plastis yang terdiri dari lima buah parameter yang terdiri dari E dan ν untuk memodelkan elastisitas tanah, Ø dan c untuk memodelkan plastisitas tanah, dan ψ sebagai sudut dilatansi. Model Mohr - Coulomb merupakan suatu pendekatan "orde pertama" dari perilaku tanah atau batuan. Model ini disarankan untuk digunakan dalam analisis awal dari masalah yang dihadapi. Setiap lapisan dimodelkan dengan sebuah nilai kekakuan rata-rata yang konstan. Karena kekakuan yang konstan, maka perhitungan cenderung cepat dan dapat diperoleh perkiraan awal dari bentuk deformasi model. Di samping kelima parameter model tersebut, kondisi tegangan awal dari tanah juga memegang peranan penting dalam hampir seluruh masalah-masalah deformasi tanah. Tegangan horizontal awal tanah harus ditentukan lebih dulu dengan menggunakan nilai K_0 yang tepat.

2.9.3 Metode Reduksi Tegangan (Reduksi Phi – c)

Hal prinsip di balik reduksi tegangan geser pada analisa elemen hingga stabilitas lereng adalah untuk mereduksi c' dan Ø' dengan sebuah faktor hingga tercapai keruntuhan. Oleh sebab itu, nilai faktor keamanan yang berhubungan dengan bidang runtuh dapat diperoleh secara bersamaan. Keruntuhan lereng diprediksi menggunakan metode elemen hingga dengan dua parameter tegangan geser yang direduksi, yaitu:

$$-$$ (2-15a)

$$——$$ (2-15b)

Keterangan :

c = kohesi tanah

Ø = sudut geser tanah

R = faktor reduksi tegangan

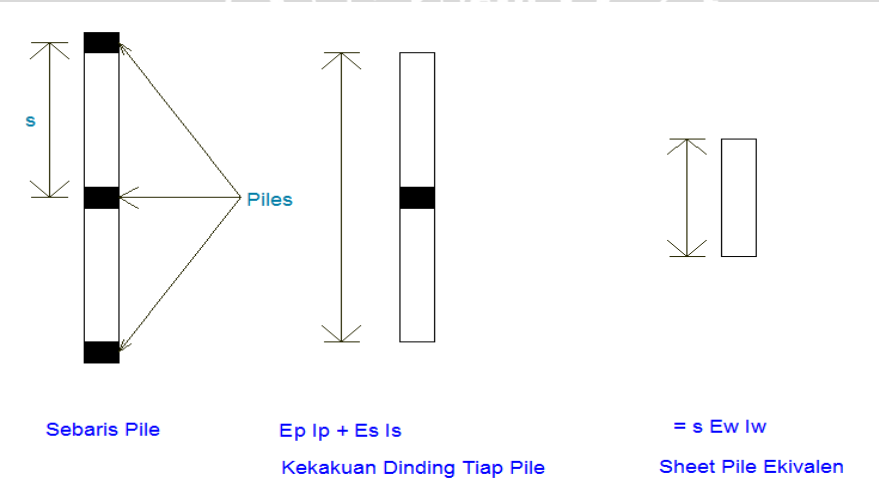
R dimulai dari 1 (tidak ada reduksi tegangan) dan ketika proses kalkulasi mulai dijalankan, R terus bertambah dan regangan geser serta perpindahan dapat diketahui untuk setiap langkah sampai keruntuhan tercapai. Faktor tegangan geser (R) saat runtuh dinamakan faktor tegangan geser kritis (R_r) yang berhubungan dengan faktor keamanan dari lereng.

Hasil kalkulasi disajikan dalam bentuk grafik yang menggambarkan progres dari R. Nilai R tidak memiliki arti fisik, hanya merupakan penyelesaian numerik. Faktor keamanan didapatkan ketika kondisi *steady* tercapai. Kondisi *steady* ditunjukkan dari berakhirnya proses kalkulasi dengan bentuk kurva lereng yang mendatar.

2.9.4 Perhitungan Stabilitas Lereng Menggunakan Program PLAXIS

Perhitungan stabilitas lereng dengan *Finite Element Method* (FEM) menghasilkan koefisien keamanan minimun yang lebih akurat dibandingkan dengan metode konvensional. Dalam penggunaan FEM untuk menganalisa sistem interaksi lereng dengan perkuatan *pile*, *pile* biasanya dianggap menjadi elastis, yang mengarahkan pada kenyataan bahwa hanya deformasi dan gaya dalam yang dapat dianalisa sedangkan sistem stabilitas dan keruntuhan lereng tidak dapat. Pengujian tentang barisan *pile* dan sistem interaksi lereng disajikan dengan program PLAXIS 8.2 yang menggunakan metode elemen hingga.

PLAXIS yang digunakan adalah PLAXIS 2D, jadi untuk mengetahui pengaruh diameter dan jarak antar *pile* tidak langsung bisa memasukkan ke dalam material *pile*. Untuk mengetahui pengaruh diameter dan jarak, maka harus mentransformasikan EI dan EA baik *pile* maupun tanah ke dalam bentuk EI ekivalen dengan s = D_1 = jarak pusat ke pusat *pile* seperti **Gambar 2.19**.



Gambar 2.19 Transformasi EI dan EA *pile* dan tanah

Untuk mentransformasikan digunakan persamaan berikut :

$I_{eq} = 1/12.D_1.h^3$ (2-16)

$EI_{eq} = (EI_{tanah} + EI_{pile})/s$ (2-17)

Elemen *beam* digunakan untuk mewakili satu baris *pile* yang dipasang pada model lereng dengan elemen perantara (*interface*). Pengaturan material baik pasir dan *pile* yang dibutuhkan untuk elemen *beam* adalah kekakuan elastis normal, EA dan kekakuan lentur, EI. Dimana E adalah modulus elastisitas *beam* (satu baris *pile*), A adalah luas penampang *beam* (satu baris *pile*) dan I adalah momen inersia *beam* (satu baris *pile*). Geometri dari metode elemen hingga untuk analisa PLAXIS dibuat sama dengan dimensi model pengujian.