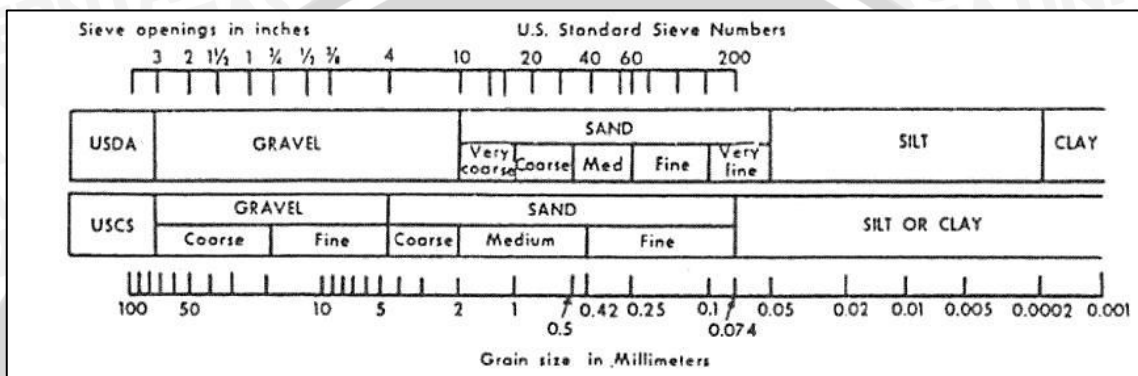


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Tanah didefinisikan sebagai lapisan permukaan bumi yang berasal dari bebatuan yang telah mengalami serangkaian pelapukan oleh gaya-gaya alam, sehingga membentuk regolit (lapisan partikel halus). Berikut jenis tanah berdasarkan ukuran partikelnya



Sumber : elearninggunadarma.ac.id

Gambar 2.1 : Skema jenis tanah dan batas ukuran butirannya (klasifikasi USCS)

Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah pasir yang berasal dari sungai. Tanah pasir merupakan tanah yang dibentuk dari batuan beku serta batuan sedimen. Tanah jenis ini memiliki butir kasar dan berkerikil. Berdasarkan lokasinya, tanah pasir dapat dibagi atas:

- Tanah pasir sungai
- Tanah pasir gunung
- Tanah pasir laut.

Sedangkan jika diklasifikasikan berdasarkan ukurannya, maka pasir dapat dibagi menjadi berbagai macam, yaitu:

- Pasir kasar : 0,6 mm - 2 mm.
- Pasir setengah kasar : 0,2 mm – 0,6 mm.
- Pasir halus : 0,06 mm – 0,2 mm.

Berdasarkan gradasinya, maka pasir dapat dibagi menjadi berbagai macam, yaitu:

- Pasir bergradasi baik : $C_u > 6$ dan $1 < C_c < 3$
- Pasir bergradasi jelek : tidak sesuai dengan syarat di atas



Pasir dengan diameter butiran antara 0,08 mm sampai 2 mm bersifat lepas, tidak berkoheksi dan mudah dilewati air. Dalam hal ini pasir dikelompokkan lagi menjadi 3 bagian berdasarkan pada nilai relatif density, yaitu:

Tabel 2.1 Jenis Tanah Pasir

Relatif Densiti	Jenis Pasir
$\leq 0,33$	Pasir Lepas
$0,33 - < 0,67$	Pasir Sedang
$\geq 0,67$	Pasir Padat

Sumber : Terzaghi (1923)

2.2 Stabilitas Lereng

2.2.1 Definisi Lereng & Kelongsoran

Lereng adalah permukaan tanah yang miring dan membentuk sudut tertentu terhadap suatu bidang horisontal dan tidak terlindungi (Das:1985). Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia. Lereng yang terbentuk secara alami misalnya: lereng bukit dan tebing sungai, sedangkan lereng buatan manusia antara lain: galian dan timbunan untuk membuat bendungan, tanggul dan kanal sungai serta dinding tambang terbuka (Arief, 2007). Selain itu lereng juga dapat juga dikelompokkan menjadi:

- Lereng terbatas (finite slope), apabila harga H_{cr} mendekati tinggi lereng (Das : 1985)
- Lereng tidak terbatas (infinite slope).

Pada lereng ini di asumsikan bahwa permukaan kelongsoran potensial adalah sejajar dengan permukaan lereng dengan kedalaman yang dangkal bila dibandingkan dengan panjang lereng. Lereng tersebut dianggap memiliki panjang tak terhingga dengan mengabaikan pengaruh ujungnya (Craig:1987).

Bila permukaan tanah tidak datar, maka komponen berat tanah yang sejajar dengan kemiringan lereng akan menyebabkan tanah bergerak ke arah bawah. Bila komponen berat tanah tersebut cukup besar, kelongsoran lereng dapat terjadi. Definisi longsor adalah bagian gerakan tanah (Purbohadiwidjojo, dalam Pangular, 1985) yang merupakan perpindahan massa tanah/batu pada arah tegak, mendatar atau miring dari kedudukan semula

Menurut Varnes (1978, dalam Hansen, 1984) longsor (*landslide*) dapat diklasifikasikannya menjadi: jatuhan (*fall*), jungkiran (*topple*), luncuran (*slide*) dan

nendatan (slump), aliran (flow), gerak bentang lateral (lateral spread), dan gerakan majemuk (complex movement). Untuk lebih jelasnya klasifikasi tersebut disampaikan pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Klasifikasi longsor (landslide)

Jenis gerakan (type of movement)			Jenis Material (type of material)		
			Batuan dasar (bedrock)	Tanah keteknikan (engineering soils)	
				Bebas, butir kasar (freedom, coarse)	Berbutir halus (predominantly fine)
Jatuhan (falls)			Jatuhan batu (rock fall)	Jatuhan bahan rombakan (debris fall)	Jatuhan tanah (earth fall)
Jungkiran (topple)			Jungkiran batu (rock topple)	Jungkiran bahan rombakan (debris topple)	Jungkiran tanah (earth topple)
Gelinciran (slides)	Rotasi	Satuan sedikit (few units)	Nendatan batu (rock slump)	Nendatan bahan rombakan (debris slump)	Nendatan tanah (earth slump)
	Translasi	Satuan banyak (many units)	Luncuran bongkah batu (rock block slide)	Luncuran bongkah bahan rombakan (debris block slide)	Luncuran bongkah tanah (earth block slide)
			Luncuran batu (rock slide)	Luncuran bahan rombakan (debris slide)	Luncuran tanah (earth slide)
Gerak horisontal / bentang lateral (lateral spreads)			Bentang lateral batu (rock spread)	Bentang lateral bahan rombakan (debris spread)	Bentang lateral tanah (earth spread)
Aliran (flow)			Aliran batu / rayapan dalam (rock flow / deep creep)	Aliran bahan rombakan (debris flow)	Aliran tanah (earth flow)
				Rayapan tanah (soil creep)	
Majemuk (complex)			Gabungan dua atau lebih gerakan (combination two or more movement)		

Sumber : Higway Reseach Board Landslide Comitte (1978, dalam Sudarsono & Pangular,1986)

2.2.2 Analisis Stabilitas Lereng

Tujuan utama dari analisis kestabilan lereng tambang adalah menghasilkan suatu rancangan dinding tambang yang aman dan ekonomis. Menurut Arief(2007) tujuan dari analisis kestabilan lereng adalah sebagai berikut :

1. Untuk menentukan kondisi kestabilan dan tingkat kerawanan suatu lereng.
2. Memperkirakan bentuk keruntuhan kritis yang mungkin terjadi.
3. Menganalisis penyebab terjadinya longsor.
4. Mempelajari pengaruh gaya-gaya luar pada kestabilan lereng.
5. Merancang suatu desain lereng galian atau timbunan yang optimal dan memenuhi kriteria keamanan dan kelayakan ekonomis.

6. Memperkirakan kestabilan lereng, selama konstruksi dilakukan maupun dalam jangka waktu yang panjang.
7. Merupakan dasar bagi rancangan ulang lereng setelah mengalami longsoran.
8. Menentukan metode perkuatan atau perbaikan lereng yang sesuai.

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. Dalam analisis stabilitas momen ini metode yang digunakan adalah Metode Keseimbangan Batas

Faktor-faktor penyebab ketidakstabilan lereng menurut Terzaghi (1950) dapat dibagi dalam 2 kelompok utama, yaitu:

A. Faktor Pengaruh Luar

Faktor pengaruh luar terjadi karena meningkatnya tegangan geser yang bekerja dalam tanah, sehingga $FK < 1$ (turun). Contoh pengaruh luar adalah sebagai berikut :

1. Tegangan Horizontal turun, kondisi ini sering terjadi bila :
 - Kaki lereng tererosi oleh aliran air sungai atau aliran air hujan
 - Galian
 - Pembongkaran *sheetpile* atau tembok penahan
2. Peningkatan Tegangan vertical, contoh dari kondisi ini adalah :
 - Meresapnya air hujan pada lereng
 - Timbunan deposit halus
 - Penambahan bangunan
3. Pergerakan tektonik

Pergerakan tektonik yang timbul dapat merubah keadaan geometri lereng. Pelandaian lereng berarti memperstabil. Sedangkan penegakan lereng mengurangi kestabilan

4. Gempa Bumi

B. Faktor Pengaruh Dalam

Penurunan kekuatan geser tanah yang sering sekali terjadi pada longsoran tanah merupakan bagian yang paling sulit diperkirakan secara teliti dan penyebab-penyebabnya adalah :

1. Kondisi Awal

Faktor-faktor yang dapat menurunkan kekuatan geser tanah dari keadaan semula adalah kondisi, struktur geologi dan geometri lereng

2. Pelapukan dan reaksi physicochemical lainnya contohnya :

- Hidrasi dan mineral lempung
- Penyusutan tanah lempung akibat perubahan temperatur dapat menimbulkan retakan susut sehingga kohesi tanah menurun
- Erosi oleh air pada tanah lempung

3. Perubahan berat volume dan tekanan air pori

Kestabilan lereng tanah tak berkohesi seperti kerikil, pasir, dan lanau banyak tergantung pada :

- Sudut geser dalam (ϕ) yang diperoleh dari uji laboratorium
- Kelandaian lereng dinyatakan dengan sudut (β)
- Berat volume tanah (γ)

2.3 Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan

2.3.1 Metode Finite Difference

Faktor keamanan didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya geser yang menahan kelongsoran dan gaya yang menggerakkan atau menyebabkan kelongsoran, atau :

$$F = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (2.1)$$

dengan :

τ adalah tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah

τ_d adalah tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor

F adalah faktor keamanan

Menurut teori *Mohr-Coulomb*, tahanan geser (τ) yang dapat dikerahkan oleh tanah, di sepanjang bidang longsor dinyatakan oleh :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.2)$$

dengan :

c = kohesi, σ = tegangan normal, dan ϕ = sudut geser dalam tanah.

Nilai-nilai c dan ϕ adalah parameter kuat geser tanah di sepanjang bidang longsor.

Dengan cara yang sama, dapat dituliskan persamaan tegangan geser yang terjadi (τ_d) akibat beban tanah dan beban-beban lain pada bidang longornya:

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d \quad (2.3)$$

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

Substitusikan persamaan (2.2) dan (2.3) ke persamaan (2.1) diperoleh persamaan faktor aman,

$$F_S = \frac{c + \sigma \tan \phi}{c_d + \sigma \tan \phi_d} \quad (2.4)$$

Persaman (2.4) dapat pula dituliskan dalam bentuk :

$$c_d + \sigma \tan \phi_d = \frac{c}{F} + \frac{\sigma \tan \phi}{F} \quad (2.5)$$

Untuk maksud memberikan faktor aman terhadap masing-masing komponen kuat geser, faktor aman dapat dinyatakan oleh :

$$F_c = \frac{c}{c_d} \quad (2.6a)$$

$$F_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \quad (2.6b)$$

dengan F_c = faktor aman pada komponen kohesi dan F_ϕ = faktor aman pada komponen geser dalam tanah. Umumnya faktor aman stabilitas lereng atau faktor aman terhadap kuat geser tanah diambil lebih besar atau sama dengan 1,2.

Berdasarkan penelitian-penelitian dan studi-studi yang menyeluruh tentang keruntuhan lereng, maka dibagi 3 kelompok rentang Faktor Keamanan ditinjau dari intensitas kelongsorannya (Bowles,1989), seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2. 3

Tabel 2.3. Hubungan Nilai Faktor keamanan dan Intensitas Longsor (Bowless,1989)

Nilai Faktor Keamanan	Intensitas Longsor
$F < 1,07$	Longsor sering terjadi (lereng labil)
$1,07 \leq F < 1,25$	Longsor pernah terjadi (lereng kritis)
$F \geq 1,25$	Longsor jarang terjadi (lereng relatif stabil)

2.3.2 Metode Finite Element dengan Plaxis 8.2

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.

2.3.2.1 Faktor Keamanan (Plaxis)

Faktor keamanan umumnya didefinisikan sebagai perbandingan dari beban runtuh terhadap beban kerja. Definisi ini 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 menggunakan prosedur 'Reduksi phi-c'.

2.3.2.2 Model Mohr-Coulomb

Model yang sederhana namun handal ini didasarkan pada parameter parameter tanah yang telah dikenal baik dalam praktek rekayasa teknik sipil. Model *Mohr-Coulomb* dapat digunakan untuk menghitung tegangan pendukung yang realistis pada muka terowongan, beban batas pada pondasi dan lain-lain. Model ini juga dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan dengan pendekatan 'Reduksi phi-c'.

2.3.2.3 Analisis Stabilitas Lereng

Metode Analisis stabilitas lereng yang digunakan pada studi ini adalah teknik reduksi kekuatan geser metode elemen hingga (SSR-FEM). Kelebihan menggunakan metode ini menurut Griffithset al (1999) adalah :

1. Asumsi dalam penentuan posisi bidang longsor tidak dibutuhkan, bidang ini akan terbentuk secara alamiah pada zona dimana kekuatan geser tanah tidak mampu menahan tegangan geser yang terjadi.
2. Metode ini mampu memantau perkembangan *progressive failure* termasuk *overall shear failure*.

Berdasarkan persamaan tegangan geser tanah (τ) *Mohr-Coulomb* (1776), kekuatan geser tanah yang tersedia atau yang dapat dikerahkan oleh tanah adalah :

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \tan \phi \quad (2.7)$$

Dalam metode ini, parameter kekuatan geser tanah yang tersedia berturut-turut direduksi secara otomatis hingga kelongsoran terjadi. Sehingga faktor aman (SF) stabilitas lereng menjadi :

$$\Sigma Msf = \tan \phi_{input} / \tan \phi_{reduksi} \quad (2.8a)$$

$$= c_{input} / c_{reduksi}$$

$$SF = \frac{\text{Kekuatan geser saat longsor}}{\text{Kekuatan geser yang tersedia}} \quad (2.8b)$$

= Nilai ΣMsf pada saat kelongsoran.

Dimana :

c_{input} = kohesi tanah

ϕ_{input} = sudut geser dalam tanah

$c_{reduksi}$ = kohesi tanah tereduksi

$\phi_{reduksi}$ = sudut geser dalam tereduksi

Adapun kriteria keamanan nilai faktor aman (SF) stabilitas lereng untuk lereng galian timbunan (cut and fill) menurut Sowers (1979) dalam Cheng Liu (1981) adalah :

- $SF < 1$ – Tidak Aman
- $1 \leq SF \leq 1,2$ – Stabilitas lereng meragukan
- $SF > 1,2$ – Aman

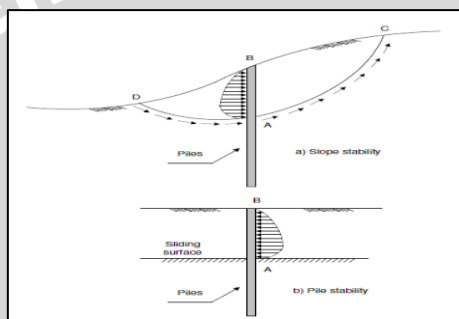
2.4 Perkuatan Lereng Menggunakan *Pile*

Penggunaan *pile* untuk menstabilkan kelongsoran aktif, dan sebagai tindakan *preventif* yang dikerjakan pada lereng stabil, menjadi salah satu teknik perkuatan lereng inovatif yang penting dalam beberapa tahun belakangan ini. *Pile* yang digunakan pada

stabilitas lereng biasanya dibebani dengan gaya lateral oleh perpindahan horisontal tanah di sekitarnya dan karena itu *pile* tersebut dianggap sebagai *pile* pasif. Penelitian yang terdahulu menyatakan bahwa kelongsoran lereng dapat distabilkan dengan meningkatkan faktor keamanan sebesar beberapa persen

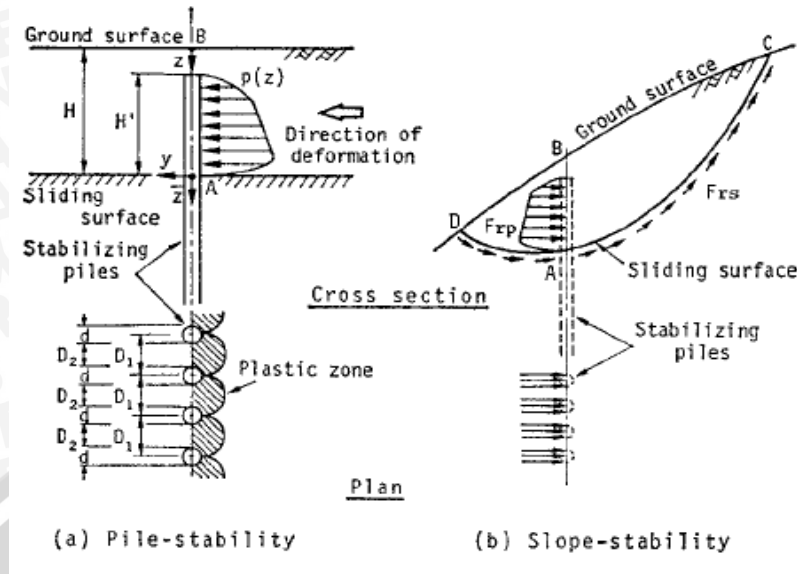
2.4.1 Analisis Stabilitas Lereng dengan *Pile*

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



Gambar 2.2 Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Sebaris *Pile*

Jika gaya lateral bekerja pada *pile* (atau reaksi gaya lateral terhadap massa longsor) diketahui, desain dari *pile* stabilisasi dapat dilakukan pada perlakuan berikut. Tercatat bahwa sebuah penaksiran gaya lateral akurat adalah sebuah poin penting utama untuk analisis stabilitas, karena efek gaya tersebut baik pada *pile* maupun lereng adalah berkebalikan



Gambar 2.3 Analisis stabilitas lereng dengan stabilitas *pile* (tiang)

Seperti tergambar pada gambar, 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 2.5.

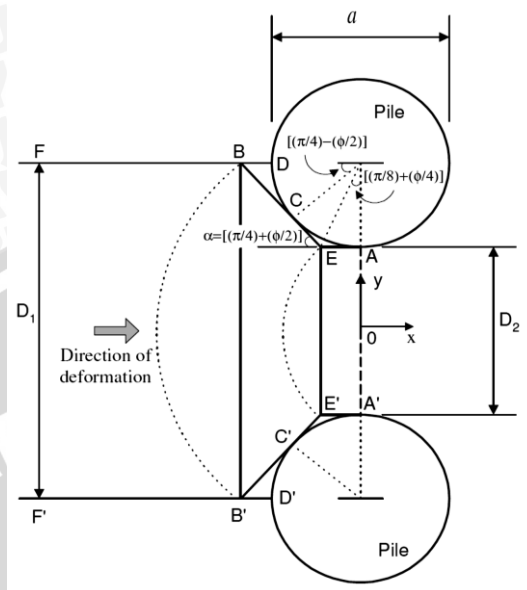
Ito dan Matsui (1975) dan Ito al et. (1979,1982) telah mengembangkan analisis sebelumnya untuk menunjukkan bahwa *pile* menahan deformasi plastis tanah seperti gerakan massa tanah atau kelongsoran, sehingga deformasi plastis tersebut dapat dicegah. Teori yang dikemukakan Ito dan Matsui disebut dengan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

2.4.2 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). Terdapat pula metode empirik dari hasil uji pembebanan secara lateral di lapangan untuk tekanan tanah pada kondisi batas disampaikan oleh Broms (1964). Tekanan tanah dalam kondisi batas menggunakan analisis metode elemen hingga tiga dimensi yang disampaikan oleh

Pan et al (2002) dan W.B. Wei (2009) serta tekanan tanah dalam kondisi batas metode elemen hingga dua dimensi yang disampaikan oleh Eng Chew Ang (2005).

a. Metode Teoritis Ito dan Matsui (1975)



Gambar 2.4 Kondisi plastis disekitar *pile*

Ito dan Matsui (1975) yang pertama kali mengusulkan metode untuk 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):

- Tanah berperilaku plastis pada daerah $AEBB'E'A'$ disekeliling *pile* seperti ditunjukkan di gambar 2.4.
- Tidak terjadi geseran pada permukaan EB dan $E'B'$ oleh karenanya tegangan pada gaya antar muka *pile*-tanah dipandang sebagai tegangan prinsipal.
- Kondisi regangan bidang terjadi pada arah kedalaman.
- Permukaan keruntuhan geser terjadi sepanjang keliling *pile* bagian dalam.
- *Pile* adalah elemen yang kaku dibandingkan elemen tanah dalam arah vertikal.
- 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.
- Gaya horizontal lateral permukaan berada di belakang dan didepan baris *pile*.

Metode analitik ito dan Matsui (1975) ini analisisnya didasarkan pada perbedaan atau tegangan lateral netto yang bekerja pada keliling *pile* dalam baris *pile* pada jarak pusat ke pusat yang konstan. Tegangan lateral netto pada *pile* bisa bervariasi dari nol

ketika tidak ada perpindahan sampai tegangan batas pada saat perpindahan lateral besar. Gaya per satuan panjang *pile* pada kondisi batas ($p(z)$) pada setiap kedalaman z dimana tanah berada pada keadaan keseimbangan plastis seperti ditunjukkan gambar 2.9 adalah fungsi dari berat isi tanah γ , sudut geser dalam tanah (ϕ), kohesi (c), jarak pusat ke pusat *pile* (D_1), dan jarak antar *pile* bagian dalam (D_2) dan z adalah kedalaman dari permukaan tanah. Berdasarkan pada asumsi diatas, gaya lateral yang bekerja pada *pile* dapat diestimasi dengan persamaan (2.9).

$$p(z) = cD_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \left[\frac{1}{N_\phi \tan \phi} \left\{ \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - 2N_\phi^{1/2} \tan \phi - 1 \right\} + \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] - c \left\{ D_1 \frac{2 \tan \phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} - 2D_2 N_\phi^{-1/2} \right\} + \frac{\gamma z}{N_\phi} \left\{ D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - D_2 \right\} \quad (2.9)$$

dimana :

D_1 = jarak pusat ke pusat antar *pile*

D_2 = jarak antar *pile* bagian dalam

ϕ = sudut geser dalam tanah

γ = berat isi tanah

z = kedalaman dari permukaan tanah

$N_\phi = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \phi/2 \right)$

Untuk jenis tanah pasir (*sand*), gaya lateral dapat diestimasi dengan menentukan $c = 0$ maka pada persamaan (2.9) dapat dituliskan menjadi persamaan (2.10).

$$p(z) = \frac{\gamma z}{N_\phi} \left\{ D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{(N_\phi^{1/2} \tan \phi + N_\phi - 1)} \exp \left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - D_2 \right\} \quad (2.10)$$

Untuk jenis tanah lempung (*clay*), gaya lateral dapat diestimasi dengan menentukan $\phi = 0$, maka pada pers (2.8) berubah menjadi persamaan (2.9).

$$p(z) = c \left\{ D_1 \left(3 \log \frac{D_1}{D_2} + \frac{D_1 - D_2}{D_2} \tan \frac{\pi}{8} \right) - 2(D_1 - D_2) \right\} + \gamma_z (D_1 - D_2) \quad (2.11)$$

b. Metode De Beer dan Carpentier (1977)

De Beer dan Carpentier (1977) dalam Sayhan Firat (2009), mengembangkan persamaan komparasi dari Ito dan Matsui (1975), persamaan tekanan tanah pada kondisi batas seperti ditunjukkan pada persamaan (2.10).

$$p = \frac{\gamma z}{N_\phi} \left(1 + \frac{\sin \phi}{2} N_\phi \right) \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{F_1(\phi)} e^{\frac{D_1 - D_2}{D_2} F_2(\phi)} - D_2 \right] + c \cot g \phi$$

$$\left[D_1 \frac{(D_1/D_2)^{F_1(\phi)}}{N_\phi} \left(1 + \frac{\sin \phi}{2} N_\phi \right) e^{\frac{D_1 - D_2}{D_2} F_2(\phi)} - D_1 - D_2 \frac{1 + \frac{\sin \phi}{2} N_\phi}{N_\phi} + D_2 \right]$$

(2.12)

dimana :

$$F_1(\phi) = \frac{N_\phi}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)} (1 - \sin \phi) \tan \phi + N_\phi (1 - \sin \phi) - 1$$

(2.13)

dan

$$F_2(\phi) = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} \tan \phi \tan\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4}\right)$$

(2.14)

Untuk jenis tanah pasir/sand, gaya lateral dapat diestimasi dengan menentukan $c = 0$ maka pada persamaan (2.12) dapat dituliskan menjadi persamaan (2.15).

$$P = \frac{\gamma Z}{N_\phi} \left(1 + \frac{\sin \phi}{2} N_\phi \right) \cdot \left[D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{F_1(\phi)} e^{\frac{D_1 - D_2}{D_2} F_2(\phi)} - D_2 \right]$$

(2.15)

Untuk jenis tanah lempung (clay), gaya lateral dapat diestimasi dengan menentukan $\phi = 0$, maka pada pers (2.12) berubah menjadi persamaan (2.16).

$$P = c \left[D_1 \left(2 \ln \frac{D_1}{D_2} + \frac{D_1 - D_2}{D_2} \tan \frac{\pi}{8} \right) - \frac{3}{2} (D_1 - D_2) \right] + (D_1 - D_2)$$

(2.16)

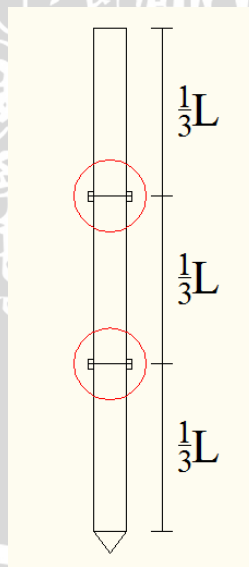
2.4.3 Reaksi *Pile*

Analisis stabilitas *pile* dilakukan untuk mengetahui bagaimana reaksi dan gaya-gaya yang bekerja pada *pile*. Adapun variabel yang dapat digunakan untuk mengukur stabilitas *pile* adalah regangan yang terjadi pada *pile*. Nilai regangan dapat dilihat dari pembacaan *strain gauge* yang dipasang di sepertiga atas dan sepertiga bawah dari panjang *pile*. Sedangkan untuk perubahan pergerakan *pile*, dapat dilihat berdasarkan pembacaan LVDT.

Melalui pembacaan *strain gauge*, dapat dilihat bagaimana reaksi *pile* terhadap gaya-gaya yang dihasilkan oleh tanah sehingga dapat dihitung besarnya gaya geser yang bekerja pada *pile*, momen pada *pile*, dan defleksi *pile* akibat gaya-gaya tanah yang bekerja. Variabel yang didapatkan dari pembacaan *strain gauge* adalah variabel regangan (ϵ), yang kemudian dianalisis kembali untuk mendapatkan besarnya gaya geser, momen dan defleksi pada *pile*.

a. Perhitungan Regangan

Dalam penelitian ini, digunakan *strain gauge* untuk menghitung nilai regangan pada *pile* yang terjadi pada setiap variasi. Adapun pemasangan *strain gauge* pada *pile* secara atas dapat dilihat pada gambar 2.5. Perhitungan nilai regangan dari pembacaan *strain gauge* dapat diolah untuk menghitung nilai momen yang bekerja pada *pile*.



Gambar 2.5 Lokasi penempatan *strain gauge* tampak samping

b. Perhitungan momen

Pada *pile*, perhitungan bending momen dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma = (P / A) \pm (M / W) , P = 0$$

$$E \cdot \epsilon_{\text{lintang}} = M / W$$

$$E \cdot \epsilon_{\text{lintang}} = (M / I) \cdot x$$

$$M = (I \cdot E \cdot \epsilon_{\text{lintang}}) / x$$

Dimana : M = Momen yang bekerja di *pile*

I = Momen inersia *pile*

E = Elastisitas *pile*

$\epsilon_{\text{lintang}}$ = regangan lintang *pile* = $\epsilon_{\text{total}} - \epsilon_{\text{axial}}$

x = jarak dari garis netral pada diagram regangan

$P = 0$ dikarenakan tidak ada gaya yang terjadi pada arah tegak lurus *pile*

c. Perhitungan defleksi

Pada perhitungan defleksi *pile*, digunakan formulasi sebagai berikut :

$$E \cdot I (d^2y / dx^2) = M$$

$$y = \{ \iint (M(x) dx) dx \} / E \cdot I$$

Dimana : y = defleksi yang terjadi pada *pile*

M = Momen yang bekerja pada *pile*

Bila dalam perhitungan distribusi bending momen sepanjang *pile* dicoba dalam bentuk persamaan cubic polynomial untuk setiap kedalaman x , maka:

$$M(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

Dimana : x = panjang *pile* sepanjang poros dari permukaan atas

a, b, c dan d = konstanta yang didapatkan dari grafik

maka,

$$y(x) = \{ \iint (M(x) dx) dx \} / E \cdot I$$

$$y(x) = 1 / EI \cdot \{ (a/20) x^5 + (b/12) x^4 + (c/6) x^3 + (d/2) x^2 + Fx + G \}$$

Dimana :

F dan G = konstanta integrasi yang didapatkan melalui persamaan kondisi batas

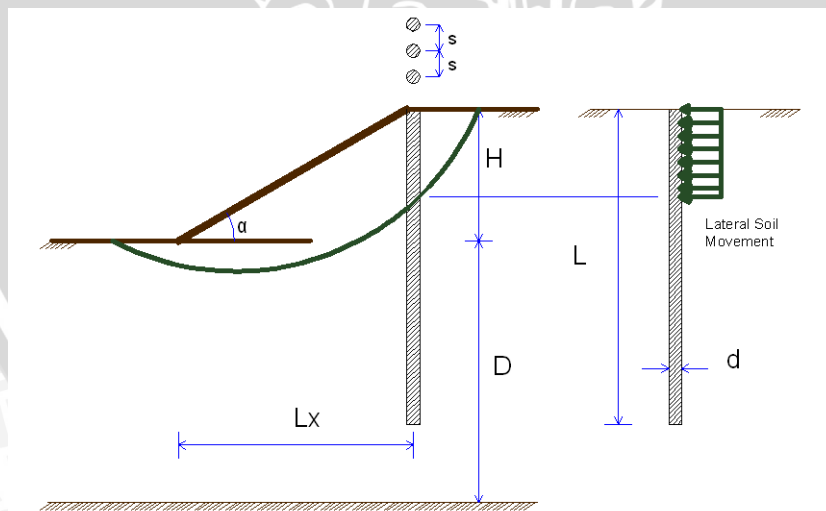
2.5 Lokasi Terbaik *Pile* pada Lereng yang Diperkuat

Penetapan lokasi terbaik pada lereng yang diperkuat tergantung pada pelaksanaan, faktor keamanan, momen dan gaya geser maksimum yang bekerja pada *pile*, banyaknya *pile* yang digunakan, baris *pile* yang digunakan serta jarak antar *pile* perkuatan seperti ditunjukkan gambar 2.6. Terdapat dua kriteria yang bisa dipenuhi sebelum memutuskan lokasi terbaik perkuatan *pile* pada lereng yang diperkuat (Poulos, 1995) sebagai berikut :

- (1) Pemancangan *pile* harus dimasukkan sampai dibawah permukaan keruntuhan kritis untuk menghindari kegagalan dipermukaan.
- (2) Untuk menghindari relokasi kegagalan permukaan dibelakang atau dimuka *pile*, *pile* perkuatan seharusnya diletakkan disekitar pusat lingkaran keruntuhan kritis.

Lee et al. (1995), mengusulkan lokasi terbaik *pile* pada tanah lempung homogen sebagai berikut :

- Perkuatan *pile* sebaiknya di kaki atau di puncak lereng.
- Diameter *pile*, jarak antar *pile* adalah faktor penting yang mempengaruhi kinerja stabilitas lereng yang diperkuat .
- Modulus tanah dan kekakuan *pile* mempunyai pengaruh yang kecil terhadap respon stabilitas lereng yang diperkuat *pile*.



Gambar 2.6 Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan *pile* yang disederhanakan

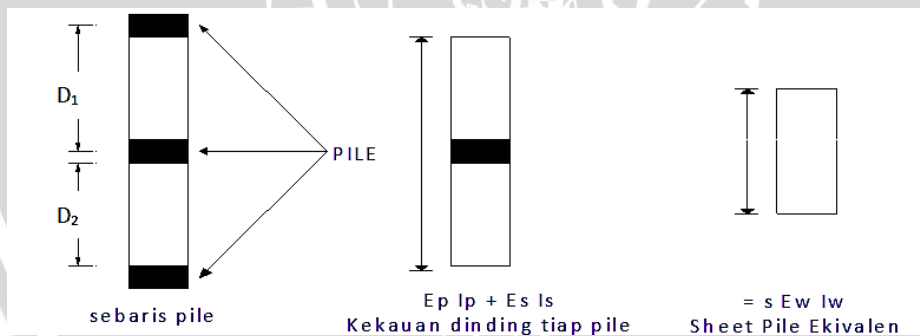
Hassiotis et al. (1997), mengusulkan lokasi terbaik *pile* untuk stabilitas lereng yang diperkuat satu baris *pile* sebagai berikut :

- Untuk memberikan faktor keamanan yang maksimum, perkuatan *pile* sebaiknya diletakkan pada tengah-tengah kemiringan lereng.
- Ujung *pile* paling atas sebaiknya terkekang berupa jepit atau sendi untuk meminimumkan momen lentur dan gaya geser yang bekerja pada *pile*

2.6 Perhitungan Stabilitas Lereng Menggunakan Program PLAXIS

Untuk menghitung stabilitas lereng dengan *Finite Element Method* (FEM) dibutuhkan asumsi yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode *finite different*, yang membuat koefisien keamanan minimum lebih akurat dibandingkan dengan menggunakan metode *finite difference*. Dengan menggunakan FEM untuk menganalisis sistem interaksi lereng dengan perkuatan *pile*, *pile* biasanya dianggap elastis, yang mengarahkan pada kenyataan bahwa hanya deformasi dan gaya dalam yang dapat dianalisis sedangkan sistem stabilitas dan keruntuhan lereng tidak dapat dianalisis. Perhitungan dengan *Finite element Method* dilakukan dengan mereduksi nilai c dan ϕ .

Pada PLAXIS yang kami gunakan adalah PLAXIS 2D, jadi untuk mengetahui pengaruh jarak dan diameter *pile* tidak langsung bisa memasukkan ke dalam material *pile*. Untuk mengetahui pengaruh jarak dan diameter maka harus mentransformasikan EI dan EA baik *pile* maupun tanah ke dalam bentuk EI ekuivalen



Gambar 2.7 Transformasi nilai EI dan EA *pile* dan tanah

- D = diameter *pile*
 D_1 = jarak pusat ke pusat *pile*
 D_2 = jarak tepi ke tepi *pile*

Untuk mentransformasikan nilai EI dan EA digunakan persamaan (2-17) dan persamaan (2-18).

$$I_{eq} = 1/12.D.D_1^3 \quad (2-17)$$

$$EI_{eq} = (EI_{tanah} + EI_{pile})/D_1 \quad (2-18)$$

Analisis metode elemen hingga pada PLAXIS didasarkan pada elemen 15 noda triangular dengan hukum integrasi *three-point* Gaussian untuk menghitung matriks kekakuan elemen. Pada kasus ini, tanah pasir untuk model lereng dimodelkan menggunakan model elastoplastis *Mohr-Coloumb*. Parameter dasar model *Mohr-Coloumb* membutuhkan lima parameter yang sangat umum yang didapatkan dari pengujian dasar sampel tanah.

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 analisis PLAXIS dibuat sama dengan dimensi model pengujian.

