

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian terdahulu yang digunakan pada penelitian ini dan perbedaan penelitian terdahulu dengan penelitian sekarang.

1. Penelitian tentang Perencanaan Kestabilan Lereng Menggunakan *Soil Nailing*

Peneliti oleh Nuraisyah Yuniati (2017) yang berjudul “Perencanaan Kestabilan Lereng Menggunakan *Soil Nailing* di Politeknik Negeri Balikpapan” bertujuan untuk menganalisa stabilitas lereng menggunakan *soil nailing* dan dengan menggunakan *software geoslope*. Perencanaan ini disebutkan bahwa adanya penurunan terhadap lereng sebelum dilakukan simulasi menggunakan *soil nailing*. Hasil dari penelitian ini adalah mendapatkan desain lereng menggunakan *soil nailing* dengan angka keamanan sebesar 2,409.

2. Penelitian tentang Analisis Stabilitas Lereng dan Alternatif Penanganannya

Penelitian oleh Apri dkk (2014) yang berjudul “Analisis Stabilitas Lereng dan Alternatif Penanganannya : Studi Kasus Longsoran Pada Ruas Jalan Pringsurat Km MGL 22+631 - 22+655 Kabupaten Temanggung” bertujuan untuk mengevaluasi kelongsoran yang terjadi pada lereng, dan memperoleh penanganan yang tepat terhadap kelongsoran yang terjadi pada lereng. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah angka keamanan pada ruas jalan sebesar 0,8262 lebih kecil dibandingkan sf minimal yang disyaratkan yaitu 1,4 sehingga lereng dalam keadaan tidak aman. Untuk mengatasi kelongsoran tanah yang terjadi diberikan 2 (dua) alternative penanganan

yaitu dengan memberikan perkuatan Geotextile jenis BW250, dan perkuatan Bored Pile kombinasi dengan timbunan tanah.

3. Penelitian tentang Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Fellenius

Penelitian ini dilakukan oleh Violleta (2014) dengan studi kasus Citraland. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui kestabilan lereng berdasarkan perhitungan faktor keamanan dengan menggunakan metode Fellenius. Hasil yang didapat dari analisis yaitu nilai faktor keamanan diperoleh sebesar 0,193 yang menunjukkan bahwa keadaan lereng tidak stabil.

4. Penelitian tentang Analisis Stabilitas Lereng dengan Perkuatan *Soil Nailing*

Menggunakan Metode Perhitungan *Fellenius* dan *Taylor* Serta Program *Geoslope*. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini adalah dari analisis menggunakan perhitungan manual didapatkan hasil kurang dari 1,5 dan program *geoslope* juga kurang dari 1,5. Sedangkan untuk analisis perkuatan lereng menggunakan metode Baji (*wedge*) dan program *geoslope* didapatkan nilai SF diatas 1,5 dan dinyatakan aman.

5. Penelitian tentang Analisis Pengaruh Pola Pemasangan *Soil Nailing* Untuk Stabilitas

Lereng. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah terjadi peningkatan nilai faktor keamanan dari sebelum diberi perkuatan, sebesar 0,9749 pada program Plaxis, dan setelah diberi perkuatan *Soil Nailing* menjadi 2,328 nilai faktor keamanan pada program Plaxis.

2.2 Stabilitas Lereng

Lereng adalah dimana kondisi tanah dengan bentuk permukaan yang tidak datar dan memiliki kemiringan tertentu dengan bidang horizontal. Ada dua jenis lereng yaitu lereng buatan dan lereng alami. Lereng buatan terjadi karena dibuat oleh manusia

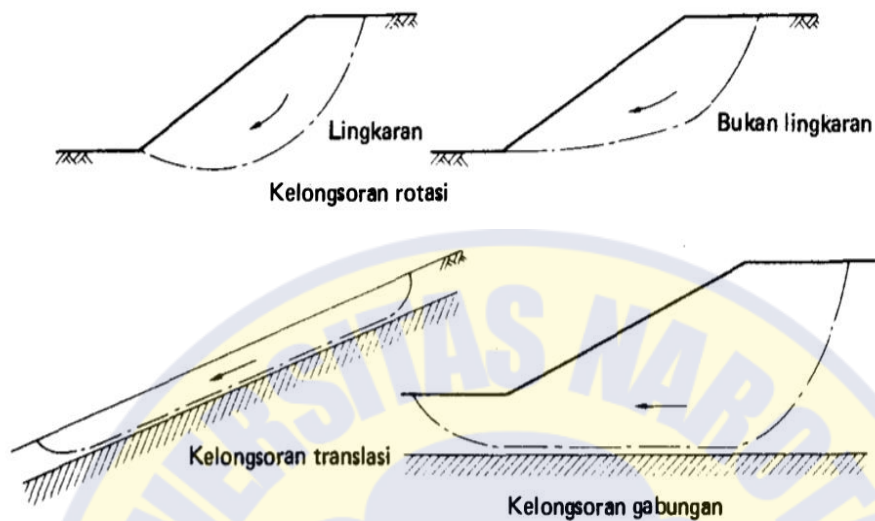
berdasarkan kebutuhan yang diinginkan. Sedangkan lereng alami adalah lereng yang terbentuk dengan sendiri akibat proses geologi yang terjadi. Setiap jenis lereng pasti ada kemungkinan terjadinya longsor, maka dari itu perlunya analisis stabilitas lereng. Analisis ini perlu digunakan juga dalam perancangan-perancangan bangunan, seperti bendungan, jalan kereta api, jalan raya, dan lain-lainnya. Pada umumnya analisis stabilitas lereng ini dilakukan untuk mengetahui angka keamanan dari suatu lereng alami maupun buatan.

2.2.1 Kelongsoran

Suatu tanah yang memiliki permukaan miring selalu ada kecenderungan akan terjadi kelongsoran. Kelongsoran dapat terjadi secara tiba-tiba pada jenis lereng buatan maupun lereng alami. Kelongsoran disebabkan karena tidak kuatnya suatu tanah untuk menahan gaya geser yang terjadi. Pada (gambar 2.1) merupakan tipe-tipe kelongsoran. Kelongsoran lereng bisa terjadi dari hal-hal sebagai berikut:

- Penambahan beban pada lereng, yang dimaksud penambahan beban ini, bisa berupa bangunan baru dan lain-lain.
- Penggalian yang mempertajam kemiringan lereng
- penggalian atau pemotongan tanah pada kaki lereng

Gambar 2.1 di bawah ini merupakan tipe-tipe kelongsoran lereng.



Gambar 2.1 Tipe-tipe kelongsoran lereng (R.F.CRAIG, 1987).

Dalam studi ini diharapkan mampu membuat kestabilan dan memeriksa keamanan terhadap lereng. 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 (Das, 1995a)

2.3 Kuat Geser Tanah

Pengetahuan mengenai kekuatan geser tanah diperlukan untuk menyelesaikan dan menganalisis masalah-masalah stabilitas tanah seperti daya dukung tanah, stabilitas lereng, dan tekanan tanah ke samping pada tembok penahan tanah. Kekuatan geser suatu massa tanah merupakan perlawanan internal tanah tersebut per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah yang dimaksud (Das, 1995b)

Kekuatan geser (τ) di suatu titik pada suatu bidang tertentu dikemukakan oleh Coulomb sebagai fungsi linier terhadap tegangan normal (σ) di bidang tersebut pada titik yang sama (Surendro, 2014). Kuat geser tanah merupakan gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan maupun tarikan, selanjutnya kekuatan geser tanah ditentukan oleh dua komponen, yaitu:

1. Gesekan dalam (sudut tahanan geser) merupakan perlawanan yang terjadi karena tanah berbutir-butir, sehingga mengunci geseran yang menyebabkan bidang permukaan menjadi kasar
2. Kohesi merupakan sifat melekatnya mineral-mineral pada tanah (*colloid*), terutama tanah yang berbutir halus.

Maka dari itu, Mohr merumuskan kekuatan geser tanah kedalam persamaan (2.1)

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (2.1)$$

Tegangan normal total (σ) pada suatu bidang di dalam massa tanah, yaitu tegangan akibat berat tanah total termasuk air didalam ruang pori, persatuan luas, yang arahnya tegak lurus. Sedangkan tekanan air pori (u), disebut juga dengan tekanan netral yang bekerja ke segala arah sama besar, yaitu tekanan air yang mengisi rongga di antara butiran padat. Tegangan normal efektif (σ') pada suatu bidang di dalam massa tanah, yaitu tegangan yang dihasilkan dari beban berat butiran tanah per satuan luas bidangnya, (Terzaghi, 1923).

Disimpulkan bahwa tegangan normal (σ) adalah jumlah dari tegangan efektif (σ') dan tekanan air pori (u). Dalam persamaan (2.2) tegangan normal (σ) dirumuskan.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.2)$$

Pada (gambar 2.2) kondisi keseimbangan plastis dapat dilihat dari kondisi tegangan. Sesuai konsep dasar Terzaghi, tegangan geser pada suatu tanah hanya dapat ditahan oleh tegangan partikel-partikel padatnya. Kekuatan geser tanah dapat juga dinyatakan sebagai fungsi tegangan normal efektif pada persamaan (2.3).

$$\tau = c' + \sigma \operatorname{tg} \varphi' \quad (2.3)$$

Dengan :

τ = kuat geser tanah (kN/m²)

c = kohesi pada tanah

φ = sudut tahanan geser pada tegangan efektif

σ = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)

u = tegangan air pori



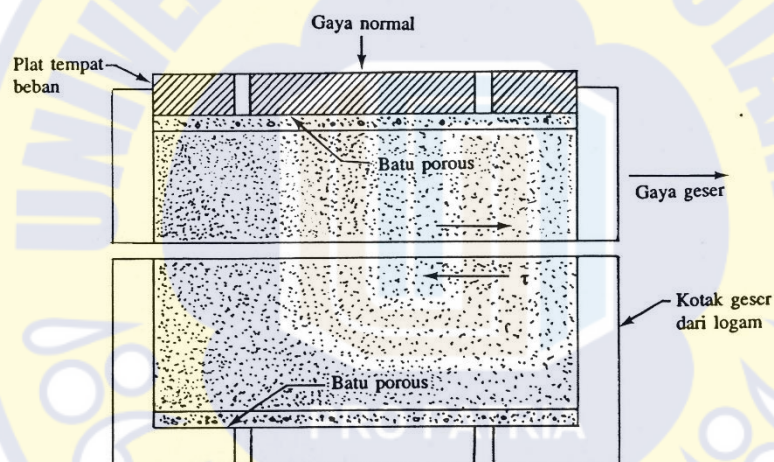
Gambar 2.2 Lingkaran Mohr (R.F.CRAIG, 1987)

Harga parameter-parameter kekuatan geser tanah dapat ditentukan dengan cara pengujian di laboratorium. Adapun beberapa cara untuk menentukan kuat geser tanah, dua diantaranya sebagai berikut.

1. Pengujian geser langsung (*Direct shear test*)
2. Pengujian triaksial (*Triaxsial test*)

2.3.1 Uji Geser Langsung (*Direct shear test*)

Maksud dari uji geser langsung adalah untuk menentukan besarnya parameter tanah yang terdiri dari sudut gesek dalam (ϕ) dan kohesi (R.F.CRAIG, 1987). Bentuk gambar diagram dari alat uji geser langsung terdapat pada (gambar 2.3).



Gambar 2.3 Diagram susunan alat uji geser langsung (Das, 1995b)

Melihat skema pembebanan diatas, maka harga tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) dapat dihitung sesuai rumus pada persamaan (2.4) dan (2.5) sebagai berikut:

$$\sigma = \text{Tegangan normal} = \frac{\text{gaya normal}(N)}{\text{luas penampang}(A)} \quad (2.4)$$

$$\tau = \text{Tegangan geser} = \frac{\text{gaya geser}(T)}{\text{luas penampang}(A)} \quad (2.5)$$

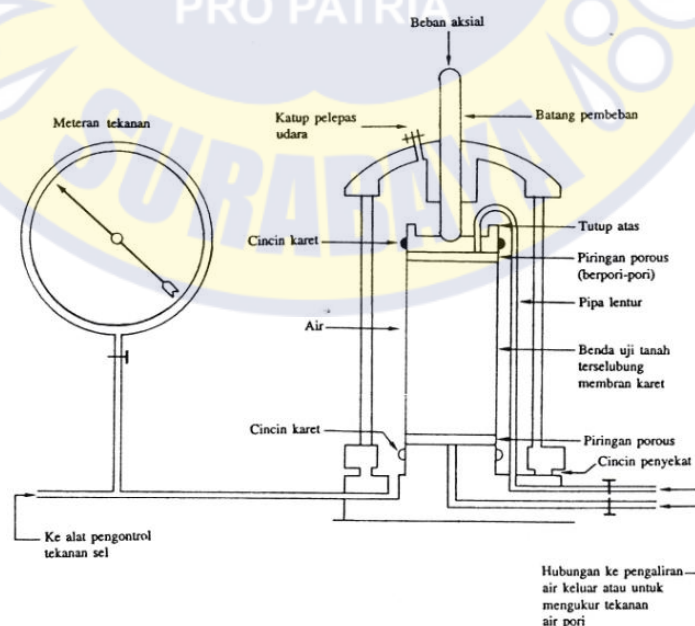
Gaya normal pada sampel tanah didapat dengan menaruh beban mati di atas sampel tanah. Beban mati tadi dapat menyebabkan tekanan pada sampel tanah sampai 150 psi (1034,2 kN/m²). Gaya geser diberikan dengan mendorong sisi kotak atas sampai terjadi keruntuhan geser. Uji geser langsung biasanya dilakukan beberapa kali pada sebuah sampel tanah yang dipengaruhi oleh jenis tanahnya.

Ada beberapa batasan atau kekurangan dalam uji geser langsung, diantaranya:

1. Tekanan air pori tidak dapat diukur
2. Tanah benda uji dipaksa untuk mengalami keruntuhan pada bidang yang ditentukan.
3. Deformasi yang diterapkan terbatas.

2.3.2 Uji Triaksial (*Triaxsial test*)

Pengujian Triaksial merupakan pengujian kekuatan geser yang banyak atau sering digunakan dan cocok untuk semua jenis tanah. Skema atau sketsa alat uji triaksial terdapat pada (gambar 2.4).



Gambar 2.4 Skema alat Uji Triaksial (Das, 1995b).

Pada uji triaksial ini mengambil sampel tanah di lapangan kira-kira berdiameter 1,5 inci (38,1 mm) dan panjang 3 inci (76,2 mm). Lalu sampel tanah tersebut ditutup dengan membran karet yang tipis dan diletakkan di dalam sebuah bejana silinder dari bahan plastik yang kemudian bejana tersebut diisi dengan air atau larutan gerusan (Das, 1995b).

Pada uji triaksial ini juga dapat diukur tekanan air pori, dengan begitu memungkinkan hasil-hasil pengujian tersebut disajikan dalam tegangan efektif. Dimana tekanan air pori harus dihitung dalam keadaan tanpa pengaliran (*no flow*), baik pengaliran keluar ataupun kedalam. Ada tiga tipe standar dari uji triaksial yang biasanya dilakukan, diantaranya sebagai berikut:

1. Tak terkonsolidasi-tak terdrainase (*Unconsolidated-undrained*)

Pada cara ini dipilih berdasarkan pembebanan yang akan dilakukan di lapangan yaitu apabila kecepatan pembebanan jauh melebihi kecepatan keluarnya air dari pori tanah, sehingga contoh tanah akan runtuh sebelum tanah terkonsolidasi ($\Delta V = 0$) dan tekanan air pori di dalam tanah akan meningkat.

2. Terkonsolidasi-tak terdrainase (*Consolidated-undrained*)

Pengujian dengan cara ini dipilih apabila lapisan tanah sudah mengalami konsolidasi (*consolidated*) sebelum beban diberikan, sehingga volume tanah sudah berubah. Namun pada saat pemberian beban, kecepatan pemberian beban melebihi kecepatan keluarnya air dari pori tanah (*undrained*).

3. Terkonsolidasi-terdrainase (*Consolidated-drained*)

Metode ini dipilih apabila lapisan tanah diijinkan mengalami konsolidasi (*consolidated*) sebelum pembebanan, dan kecepatan pembebanan relatif lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan keluarnya air dari pori tanah (*drained*).

Di bawah kondisi tertentu, kekuatan geser dalam keadaan tanpa pengaliran dinyatakan dalam tegangan total, dengan parameter-parameter kekuatan gesernya dinotasikan sebagai c_u dan ϕ_u . Kekuatan geser dalam keadaan terdrainasi (dengan pengaliran) dinyatakan dalam parameter-parameter tegangan efektif c' dan ϕ' (R.F.CRAIG, 1987).

2.4 Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Untuk menghitung angka faktor keamanan (SF) yang melawan gaya runtuh pada stabilitas lereng tersebut. Umumnya angka keamanan didefinisikan seperti pada persamaan (2.6) sebagai berikut:

$$SF = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (2.6)$$

SF = angka keamanan terhadap kekuatan tanah

τ_f = kekuatan geser rata-rata dari tanah

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

Kekuatan geser terdiri dari dua komponen, yaitu kohesi dan geseran, dapat ditulis seperti pada persamaan (2.7) atau persamaan (2.8) sebagai berikut :

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.7)$$

c = kohesi

ϕ = sudut geser tanah

σ = tegangan normal rata-rata pada permukaan bidang longsor

Atau dapat ditulis,

$$\tau_d = cd + \sigma \tan \phi d \quad (2.8)$$

Dimana cd adalah kohesi dan ϕd adalah sudut geser yang bekerja sepanjang bidang longsor, sehingga mendapat seperti pada persamaan (2.9) sebagai berikut,

$$SF = \frac{c + \sigma \tan \phi}{cd + \sigma \tan \phi d} \quad (2.9)$$

Untuk memberikan faktor aman terhadap masing-masing komponen kuat geser, maka faktor keamanan dapat dinyatakan seperti persamaan (2.10) di bawah ini :

$$Fc = \frac{c}{cd} \text{ dan } F\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi d} \quad (2.10)$$

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

Pada tabel 2.1 dijelaskan angka nilai faktor keamanan sesuai dengan SNI persyaratan geoteknik 8460-2017. Apabila faktor keamanan suatu lereng lebih besar dari 1,5 umumnya lereng tersebut dapat dikatakan stabil.

Tabel 2.1 Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng (SNI Geoteknik, 2017)

Biaya dan konsekuensi dari kegagalan lereng	Tingkat ketidakpastian kondisi analisis	
	Rendah ^a	Tinggi ^b
Biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,5	2,0 atau lebih
^a Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan rendah, jika kondisi geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah konsisten, lengkap dan logis terhadap kondisi di lapangan. ^b Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan tinggi, jika kondisi geologi sangat kompleks, kondisi tanah bervariasi, dan penyelidikan tanah tidak konsisten dan tidak dapat diandalkan.		

2.5 Metode Elemen Hingga

2.5.1 Umum

Elemen yang umum digunakan dalam analisis struktur ditetapkan dari tanggap/respon sistem struktur terhadap beban luar. Dari unsur-unsur elemennya, MEH merupakan proses pemodelan sistem struktur menggunakan elemen-elemen yang dirakit

disebut elemen hingga. Suatu fungsi perpindahan dinyatakan pada setiap elemen hingga. Setiap elemen yang dirakit, langsung maupun tidak langsung, pada setiap elemen lainnya melalui nodal-nodal di ujung elemen, permukaan atau perbatasan dengan menggunakan sifat-sifat tegangan atau regangan yang diketahui bagi bahan struktur. Dengan cara ini, maka dapat ditentukan perilaku nodal-nodal dalam suatu sistem struktur. Total persamaan perilaku dari setiap nodal menghasilkan satu seri persamaan aljabar yang dinyatakan dalam notasi matriks.

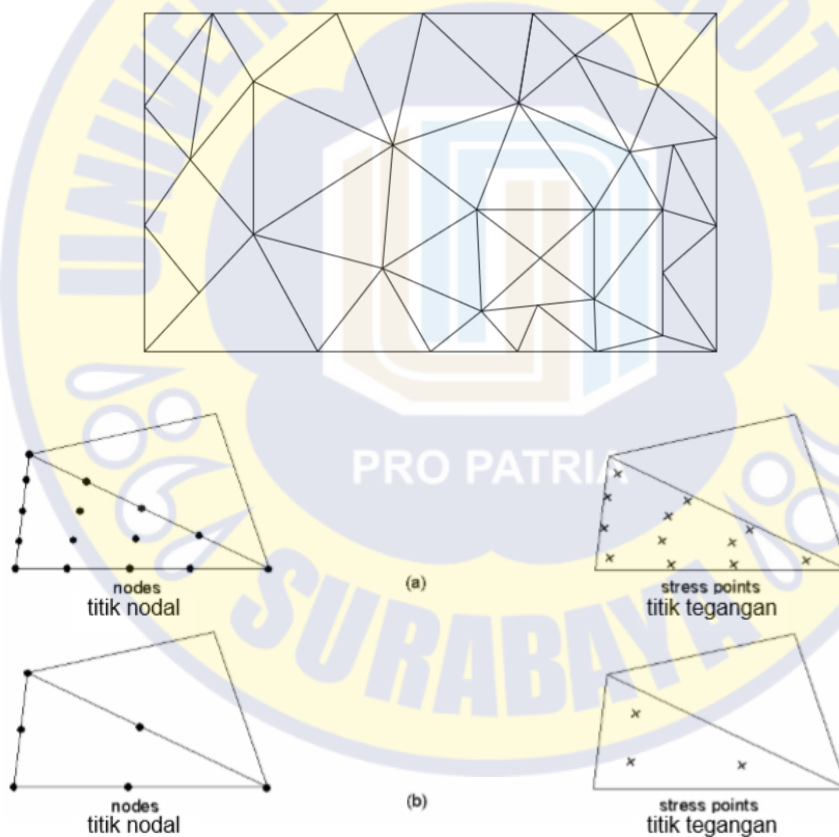
2.5.2 Tahapan Metode Elemen Hingga

2.5.2.1 Dikritisasi

Sistem struktur dibagi dalam elemen-elemen hingga (atau diskritisasi jaring elemen). Elemen-elemen ini membentuk sistem melalui titik-titik nodal. Pemilihan tipe elemen, dan jumlah nodal elemen digunakan dalam berbagai variasi dan ukuran berdasarkan pertimbangan rekayasa (geoteknik) dalam analisis. Elemen yang dipakai harus cukup kecil supaya memberikan hasil yang akurat, walau komputasi yang dilakukan menjadi lebih banyak. Elemen besar dapat digunakan jika hasil yang diperoleh cukup untuk kondisi tertentu (misal, deformasi yang terjadi tidak signifikan). Pemilihan elemen yang digunakan dalam analisis elemen hingga bergantung dari kondisi fisik struktur akibat pembebanan dan sejauh mana pendekatan analisis yang dilakukan guna memperoleh perilaku sesungguhnya.

Penilaian mengenai idealisasi dimensional bidang/ruang maupun tunggal diperlukan. Elemen dasar yang paling sederhana disebut elemen linear yang mempunyai dua nodal pada setiap ujungnya. Elemen orde yang lebih tinggi dapat mempunyai 3 nodal atau lebih. Bagi elemen dasar dimensional bidang atau elemen bidang, terjadi respon gaya-gaya di

dalam bidang itu sendiri yang disebut kondisi tegangan atau regangan bidang. Bentuk elemen bidang segi-tiga atau segi-empat adalah elemen dimensional bidang yang paling sederhana dengan nodal-nodal pada ujung dan perhubungan linear pada syarat batas. Pada orde yang lebih tinggi, elemen bidang mempunyai nodal tengah yang disebut sebagai elemen kuadratik. Elemen ini dapat mempunyai ketebalan konstan atau bervariasi. Contoh lain adalah diskretisasi jaring elemen pada fondasi telapak seperti pada Gambar 2.5 berikut ini:



Gambar 2.5 Titik Nodal dan Titik Integrasi (*Tutorial Plaxis 2D Versi 8, n.d.*)

2.5.2.2 Pemilihan Model atau Fungsi Pendekatan

Tahapan ini dilakukan untuk memilih model atau fungsi pendekatan untuk besaran yang tidak diketahui perpindahannya pada suatu titik. Pada elemen segitiga, terdapat dua perpindahan yang tidak diketahui u, v pada titik $P(x,y)$. Dengan melakukan pendekatan, terdapat perpindahan pada persamaan (2.11) dan (2.12) perpindahan tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$u(x,y) = \alpha_1 + \alpha_2x + \alpha_3y \quad (2.11)$$

$$V(x,y) = \alpha_4 + \alpha_5x + \alpha_6y \quad (2.12)$$

Persamaan (2.11) dan (2.12) jika ditulis dalam matriks seperti dibawah ini :

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

Atau bisaseperti persamaan (2.14) dibawah ini :

$$\{U\} = [\phi] \{\alpha\} \quad (2.14)$$

Keterangan :

$$\{U\} = [u, v]$$

$$\{\alpha\} = [\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6]$$

$$[\phi] = \text{matriks koordinat}$$

Evaluasi u dan v di tiga simpul seperti persamaan (2.15) dan (2.16), apabila ditulis dalam matriks seperti persamaan (2.17).

$$U_n = \alpha_1 + \alpha_2x_n + \alpha_3y_n \quad (2.15)$$

$$V_n = \alpha_4 + \alpha_5 x_n + \alpha_6 y_n \quad (2.16)$$

Persamaan diatas jika ditulis dalam matriks menjadi:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ \frac{u_k}{v_i} \\ v_j \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{0} & \frac{x_k}{0} & \frac{y_k}{0} & 0 & \frac{1}{x_i} & \frac{1}{y_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Invers dari persamaan (2.17) diatas ada pada persamaan (2.18) dibawah ini :

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} = \frac{1}{2,4} \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ \frac{u_k}{v_i} \\ v_j \\ v_k \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$[H] = \begin{pmatrix} (x_j y_k - x_k y_j) & (x_k y_i - x_i y_k) & (x_i y_j - x_j y_i) \\ (y_i - y_k) & (y_k - y_i) & (y_i - y_j) \\ (x_k - y_j) & (x_i - x_k) & (x_j - x_i) \end{pmatrix}$$

Disederhanakan menjadi : $A = \frac{1}{2} x_j y_k$

$$[H] = \begin{bmatrix} (X_j Y_k) & (0) & (0) \\ (-Y_k) & (Y_k) & (0) \\ (X_k - Y_j) & (-X_k) & (X_j) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

2.5.2.3 Menentukan Hubungan Regangan-Perpindahan dan Tegangan-Regangan

Hubungan regangan atau perpindahan dan tegangan perpindahan diperlukan bagi penurunan persamaan setiap elemen hingga. Suatu benda yang dibebani dalam dua dimensi (x-y), variasi ketebalan terhadap z, arah melintang adalah konstan. Maka dari itu keenam komponen tegangan dalam benda tiga dimensi ($\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz}$) tiga komponen tegangan dalam arah z ($\sigma_z \tau_{xz} \tau_{yz}$) dapat diabaikan. Tiga komponen tegangan sisanya

($\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}$). Komponen regangan juga memiliki enam komponen dalam kondisi tiga dimensi ($\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{xz} \gamma_{yz}$) dan dalam bidang dua dimensi semua komponen dalam arah z ($\varepsilon_z \gamma_{xz} \gamma_{yz}$) dapat diabaikan seperti pada persamaan (2.20) dan (2.21).

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

Yang merupakan fungsi koordinat x dan y saja. Pada material linier, elastik, dan isotropik maka sifat bahan dapat dinyatakan dengan hukum Hooke seperti pada persamaan (2.22), (2.23) dan (2.24), apabila dalam notasi matriks sesuai pada persamaan (2.25).

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \quad (2.22)$$

$$\sigma_y = \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \quad (2.23)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} \quad (2.24)$$

Dalam notasi matriks

$$\{\sigma\} = [C] \{\varepsilon\} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Dalam idealisasi tegangan bidang 2 dimensi (z dianggap konstan) nilai regangan bidang dapat dinyatakan dengan persamaan (2.26) dan (2.27) sehingga diperoleh persamaan (2.28) dibawah ini :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial y} \quad (2.26)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \left(\frac{\partial v}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (2.27)$$

Sehingga diperoleh:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \\ B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \end{bmatrix} \{q\} \quad (2.28)$$

Atau

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\}$$

Apabila regangan total (ε) sebagai jumlah tegangan elastik efektif (ε^e) dan terdapat residu (ε_0) sebelum beban diterapkan, maka tegangan dijabarkan seperti persamaan (2.29) dibawah ini :

$$\{\tau\} = [C]\{\varepsilon\} = [C](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) = [C]\{\varepsilon^e\} \quad (2.29)$$

Matriks $[C]^{-1} = [D]$, dengan $[D]$ adalah matriks regangan-tegangan pada persamaan (2.30)

$$[D] = \frac{1-v^2}{E} \begin{bmatrix} 1 & -v & 0 \\ -v & 1-v & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{1-v} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.5.2.4 Perakitan Elemen dan Penyusunan Persamaan Global

Perakitan persamaan matriks elemen dan penyusunan persamaan global atau struktur dengan syarat-syarat batasnya menggunakan metode superposisi yang merupakan keseimbangan gaya nodal untuk memperoleh persamaan global bagi sistem struktur.

2.6 Bioengineering

Bioengineering merupakan salah satu teknologi yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kestabilan lereng. Dimana *bioengineering* sendiri menggunakan bahan dari tanaman hidup, untuk mengatasi persoalan-persoalan mengenai alam lingkungan seperti longsor pada lereng. Pada (gambar 2.6) adalah salah satu contoh *bioengineering* yang telah diterapkan pada lereng.

Bioengineering tanah melibatkan penggunaan vegetasi, terutama stek hidup, yang tertanam di tanah di mana mereka bertindak sebagai penguat tanah, saluran hidraulik, sumbu, dan penghalang untuk erosi permukaan atau gerakan bumi dangkal (Goldsmith, Donald, & McCullah, 2014). Dalam penerapan *bioengineering* vegetasi mempunyai peranan penting dalam mengurangi kecepatan aliran permukaan yang bisa menyebabkan partikel-partikel tanah yang tidak padat hanyut. Menurut Mohammad Nordin, vegetasi memainkan peranan penting dalam fungsi penguatan dan membentuk rangkaian ikatan pada lapisan tanah. Keberadaan akar tanaman dapat mengurangi tegangan air pori positif dan memperbesar tegangan air pori negatif. Proses ini meningkatkan kekuatan tanah khususnya tegangan geser dalam menjaga kestabilan lereng, keberadaan akar tanaman juga dapat meningkatkan kekuatan tanah. Banyak jenis tanaman yang bisa digunakan pada metode *bioengineering*, namun tidak semua jenis tanaman cocok untuk digunakan. Jenis tanaman yang cocok untuk digunakan pada metode ini adalah yang mempunyai karakteristik tumbuh dengan cepat dan berakar cukup dalam dan lebat.



Gambar 2.6 Contoh *Bioengineering*

(<https://www.google.com/search?q=crib+of+slope+stabilization>)

2.7 Soil Nailing

2.7.1 Sejarah Soil Nailing

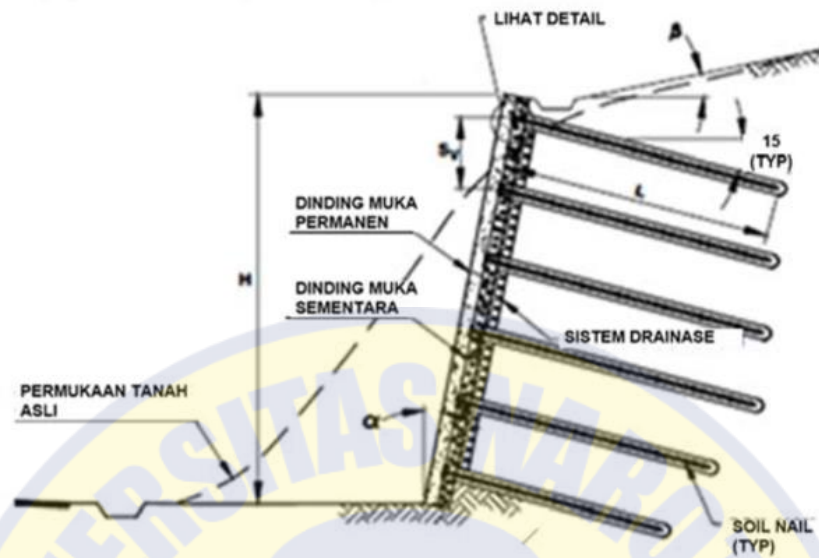
Pada tahun 1961 di Perancis, pertama kalinya perkuatan dengan *Soil Nailing* diaplikasikan sebagai perkuatan dinding penahan tanah. *Soil nailing* adalah sistem perkuatan lereng yang bersifat pasif, artinya tanpa gaya prategang. Sistem perkuatan ini utamanya terdiri atas sejumlah *nail bar* yang dipasang di dalam tanah dengan cara dibor atau dipancang dan dinding muka berupa beton semprot yang diperkuat (*reinforced shotcrete*) sebagai komponen dasar dinding muka (SNI Geoteknik, 2017). Salah satu dinding penahan tanah yang menggunakan perkuatan ini dapat ditemukan pada proyek pelebaran jalan kereta api dekat Versailles, Perancis pada tahun 1972, dengan ketinggian lereng sebesar 18 meter dan kemiringannya sebesar 70°. Karena dianggap lebih efektif dari segi biaya dan proses konstruksinya lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional lainnya maka digunakanlah perkuatan dengan metode *Soil Nailing* ini.

2.7.2 Elemen Dasar Soil Nailing

Secara umum elemen-elemen dasar yang diperlukan dalam praktek *soil nailing* sebagai berikut:

1. Nail Bar

Baja ulir atau *Nail bar* merupakan batangan baja yang digunakan pada praktek pekerjaan *soil nailing*. *Nail bar* tersebut dipasang dengan sudut kemiringan mendekati horizontal yaitu dipasang pada 10 hingga 20 derajat dari horizontal, dan paling umum pada 15 derajat. (Gambar 2.7) adalah contoh perkuatan *Soil Nailing* beserta keterangannya.



Gambar 2.7 Contoh *Soil Nailing* (SNI Geoteknik, 2017)

2. *Nail Head*

Nail head adalah bagian ujung dari baja yang menonjol keluar dari dinding. Komponen ini terdiri dari *bearing plate* (pelat penahan), *hex nut* (mur persegi enam), *washer* (cincin yang terbuat dari karet atau logam). *Bearing plate* umumnya berbentuk kubus yang terbuat dari pelat baja berukuran tipikal 200 mm x 200 mm sampai dengan 250 mm x 250 mm, dengan tebal 19 mm (SNI Geoteknik, 2017).

3. *Grout* (Cor beton)

Cor beton untuk pekerjaan *soil nailing* berupa material semen. Material grout dibuat dari semen tipe 1, dengan tipikal rasio air/semen (w/c ratio) 0,4 – 0,5. Persyaratan kuat tekan grout dalam 28 hari adalah 21 MPa. Bahan tambah umumnya tidak digunakan kecuali plasticizer untuk memperbaiki workability (SNI Geoteknik, 2017).

4. *Wall Facing* (Muka/Tampilan Dinding)

Terdapat dua tahapan dalam pembuatan *wall facing* tersebut.

Tahap pertama, dengan cara penyemprotan atau *shotcrete* dinding muka yang mempunyai tebal tipikal 75 mm – 100 mm, dilengkapi dengan 1 lapis *wiremesh* M6 (ukuran 6 mm). Beton semprot disyaratkan mempunyai kuat tekan $f_c' \geq 18$ MPa.

Tahap kedua adalah dengan cara pembuatan balok balok arah horizontal dan arah vertikal. Pada tahap kedua ini sebenarnya memiliki fungsi yang tidak jauh berbeda dengan pembuatan *wall facing* tahap pertama, tetapi pada tahap ini fungsi proteksi terhadap erosi jauh lebih baik, dan dapat juga digunakan untuk menambah keindahan (fungsi estetika).

5. *Centralizer*

Centralizer adalah sebuah benda yang terbuat dari PVC atau material sintetik lainnya. Benda ini dipasang secara berurutan sepanjang *nail bar* dengan interval $\leq 2,5$ m, dan berjarak 0,5 m dari kedua ujung *nail bar* (SNI Geoteknik, 2017). Berfungsi untuk memastikan tebal selimut beton sesuai dengan perencanaan.



Gambar 2.8 *Centralizer* (SNI Geoteknik, 2017)

6. *Drainage System* (Sistem Drainase)

Biasanya lembaran vertikal geokomposit dipasang di antara muka dinding sementara dan permukaan galian untuk mencegah meningkatnya tekanan air pada lereng di belakang muka dinding. Pada kaki lereng harus disediakan saluran pembuangan (*weep hole*) untuk air yang telah dikumpulkan oleh lembaran geokomposit.

